

Energie, climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients

Des infrastructures numériques adaptées à la
double contrainte carbone

Annexes

Mars 2024

Illustration couverture : Virgile Bellaïche

Table des matières

Table des matières	2
Table des figures	3
Table des tableaux.....	3
 ANNEXE 1 – DESCRIPTION DETAILLEE DU MODELE.....	5
 ANNEXE 2 – DESCRIPTION DES ZONES GEOGRAPHIQUES	22
 ANNEXE 3 - RAYONS DE CELLULES POUR LA COUVERTURE	23
 ANNEXE 4 – DISCUSSION SUR LE DEPLOIEMENT DES PETITES CELLULES EN ONDES MILLIMETRIQUES	25
 ANNEXE 5 – COMPARAISON AVEC L’INFRASTRUCTURE RESEAU METROPOLITAINE ACTUELLE	27
 ANNEXE 6 – MODELISATION RESEAUX MOBILES : FIGURES ET DONNEES COMPLEMENTAIRES	29
 ANNEXE 7 – CONSTELLATIONS EN ORBITES BASSES : PREVISIONS DU SECTEUR POUR 2020-2050 : DONNEES, HYPOTHESES ET MODELE	32
 ANNEXE 8 - LATENCE, COUVERTURE, CAPACITE : COUT ENVIRONNEMENTAL DE NOS CHOIX DE SERVICES : DONNEES ET HYPOTHESES	34
 ANNEXE 9 – RECOMMANDATIONS DETAILLEES : ACTIONS A MENER ET ACTEURS A MOBILISER.....	36
 REFERENCES	48

Table des figures

Figure 1 - Rayon de cellule en bande LOW en zone rurale).....	24
Figure 2 - Rayon de cellule en bande LOW en zones urbaine et péri-urbaine (à droite)	24
Figure 3 - Nombre de sites-opérateurs décomposés par années et par type de technologie et bande déployée pour notre modèle, la base ANFR, et une extrapolation à 4 opérateurs de l'infrastructure de l'opérateur Orange.....	27
Figure 4 – Consommations électriques annuelles pour notre modèle, les données ARCEP, et le RAN de l'opérateur Orange extrapolé à 4 opérateurs (Bou Rouphael et al., 2023).	28
Figure 5 – Nombre de stations de base présentes au total sur tout le territoire national (courbe bleue) et par couple « technologie – bande de fréquence » (diagrammes barres), dans le scénario d'usages alternatif « Usages : croissance maîtrisée » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	29
Figure 6 - Ratio « capacité/trafic » pour la technologie 5G par zone géographique, pour le scénario « Cahier des charges », scénarios d'usages « Usages : croissance maîtrisée » (en haut) et « Usages : référence » (en bas) Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	30
Figure 7 – Scénarios d'usages : évolutions de la consommation de données sur le territoire français métropolitain selon les scénarios Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	30
Figure 8 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges » et « Eco-conception », pour les scénarios d'usages « Usages : référence », « Usages : croissance maîtrisée » et « Trafic stable » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	31
Figure 9 – Consommation d'électricité annuelle en phase d'opération (à gauche) et émissions carbonées annualisées associées aux phases de production et d'opération en approche « stock » et « flux » (à droite), dans le scénario « Eco-conçu et sobre » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	31

Table des tableaux

Tableau 1 - Description et caractérisation des variables temporelles et territoriales dans le modèle Source : The Shift Project, à partir de (INSEE, 2023).....	6
Tableau 2 - Description et caractérisation des variables liées à la demande de trafic dans le modèle Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	8
Tableau 3 - Description et caractérisation des variables liées à la couverture dans le modèle Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport	9

Tableau 4 - Description et caractérisation des variables liées aux caractéristiques du réseaux dans le modèle Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport.....	11
Tableau 5 -Rayons de cellule considérés dans le cadre de cette étude.....	12
Tableau 6 – Capacités cellulaires considérées dans le cadre de cette étude	12
Tableau 7 -Règles de dépendance appliquées entre les technologies et les bandes appliquées dans le cadre de cette étude	13
Tableau 8 – Modèle de consommation énergétique	20
Tableau 9 – Modèle d’empreinte embarquée	21
Tableau 10 – Statistiques en superficies et population des zones Source : The Shift Project, à partir de (INSEE, 2023)	22
Tableau 11 – Constellations en orbites basses : prévisions du secteur pour 2020-2050 Sources : A compléter, les données en italique sont des hypothèses	32
Tableau 12 – Empreinte carbone de trois réseaux satellitaires type	35

Annexe 1 – Description détaillée du modèle

Les entrées du modèle

Période temporelle étudiée. On étudie l'évolution des réseaux mobiles en France métropolitaine entre $t_0 = 2024$ et $t_f = 2035$. L'introduction de la 6G est prévue à la date $t_{6G} = 2030$. L'introduction des petites cellules 5G en ondes millimétriques est prévue dans le modèle à la date $t_{mmw} = 2026$. On considère également une phase "d'échauffement" du modèle qui commence avant t_0 et avant l'introduction de la 5G à $t_w = 2020$. Cette phase nous permet de partir d'un déploiement réaliste en termes de stations 4G au moment où la 5G commence à être déployée.

Les caractéristiques du territoire. La France métropolitaine est divisée en $N_z = 8$ zones géographiques de densités croissantes :

- EMPTY,
- RURAL_1,
- RURAL_2,
- RURAL_3
- PERI_URBAN_1,
- PERI_URBAN_2
- URBAN_1,
- URBAN_2.

Chaque zone géographique i est caractérisée par une population p_i à t_0 et une superficie s_i . Ces valeurs ont été obtenues par une analyse de la grille de densité de population à la résolution de 1 km x 1 km de l'INSEE combinée à des opérations de morphologie mathématique pour prendre en compte le fait que la portée des cellules de basse fréquence a une portée bien plus importante que 1 km, notamment pour les zones de faible ou moyenne densité. Au cours du temps, les populations sont ajustées en prenant en compte un taux d'accroissement annuel de la population nationale. En se référant aux données Insee (INSEE, 2023), on obtient l'évolution affine suivante :

$$p_i(t) = p_i(t_0) + \alpha_p(t - t_0) \times \frac{p_i(t_0)}{P(t_0)}$$

, où α_p est la pente de l'accroissement annuel de la population totale.

La somme des populations des zones est égale à la population en France métropolitaine à t_0 : $P(t) = \sum_{i=0}^{N_z-1} p_i(t)$. La somme des superficies des zones $S = \sum_{i=0}^{N_z-1} s_i$ est quant à elle légèrement supérieure à la superficie terrestre de la France métropolitaine car les sites installés dans les zones peuplées en bord de côtes ou de la frontière couvrent au-delà de la limite terre-mer ou de la

frontière. Chaque zone géographique est vue comme une zone homogène en termes de trafic, de propagation radio et de densité de population.

Paramètre	Description	Valeur par défaut
t_w	Début de la période d'échauffement	2020
t_0	Début de la période étudiée	2024
t_{mmw}	Date des premiers déploiements des petites cellules 5G en ondes millimétriques	2026
t_{6G}	Date des premiers déploiements 6G	2030
t_f	Fin de la période étudiée	2035
N_z	Nombre de zones géographiques	8
$[p_i(t_0), s_i]$	Population (en millions) et superficie (en km ²) des zones géographiques à t_0	Voir « Annexe – Données complémentaires »
α_P	Pente de l'accroissement annuel de la population	210,2x10 ³
$P(t_0)$	Population totale à t_0 (en millions)	63
S	Superficie totale de la France métropolitaine en km ²	564 654

Tableau 1 - Description et caractérisation des variables temporelles et territoriales dans le modèle
Source : The Shift Project, à partir de (INSEE, 2023)

La demande de trafic de données. On considère le volume moyen $V(t)$ de données consommées par habitant¹ et par mois à la date t . Ce volume est converti en un volume par jour en supposant que tous les jours sont identiques. Comme le trafic n'est pas réparti de manière uniforme au long de la journée, il convient de considérer la proportion ρ_{BH} de données consommées au cours de l'*heure chargée*, c'est-à-dire l'heure à laquelle le volume consommé est le plus élevé. Cette heure chargée est généralement utilisée pour effectuer le dimensionnement des infrastructures de réseaux. Ce trafic par zone géographique est ensuite réparti selon les technologies en considérant des proportions $\rho_{4G}^{(i)}(t)$, $\rho_{5G}^{(i)}(t)$, $\rho_{6G}^{(i)}(t)$, telles que $\rho_{4G}^{(i)}(t) + \rho_{5G}^{(i)}(t) + \rho_{6G}^{(i)}(t) = 1$, de partage du trafic dans la zone i à la date t . Ce trafic par zone géographique et par technologie est lui-même servi par N_{OP} opérateurs identiques. Le trafic de

¹ Notre modèle étant basé sur la population et la superficie des zones, nous utilisons ici un volume de trafic moyen par habitant, plutôt qu'un volume moyen par abonnement ou carte SIM. Dans la suite, le trafic « *machine-2-machine* » pourra être pris en compte en ajoutant un volume de trafic spécifique.

données en Mbits/s à la date t dans la zone géographique i généré par les terminaux de technologie $\tau \in \{4G, 5G, 6G\}$ servis par l'opérateur générique est donc :

$$T_{i,\tau}(t) = \frac{12 \times 8 \times 1000}{365.25 \times 3600} \times p_i(t) \times \rho_{BH} \times V(t) \times \rho_{\tau}^{(i)}(t) \div N_{Op}$$

La Figure 6 montre que le trafic augmente de façon parfaitement linéaire depuis plusieurs années. Aussi, par défaut nous supposons que $V(t)$ suit aussi la tendance avec : $V(t) = V_0 + \alpha_T (t - t_0)$, où V_0 est le volume moyen de données consommées par habitant et par mois à t_0 en Go/mois.

On ne dispose actuellement pas des données permettant de connaître la proportion de trafic servie par chaque technologie. Nous nous basons donc dans ce modèle sur le taux d'adoption des technologies ainsi que sur un biais de trafic associé à chacune d'entre elles. Nous supposons que tous les terminaux sont capables de communiquer en 4G, c'est-à-dire que le taux d'adoption 4G est de 100%. Pour la 5G, on observe un taux d'adoption qui a évolué de 0% en 2021 à 13,4% au début de 2023. Une progression linéaire nous mène à 100% en 2035 ((Arcep, 2023c)). Nous faisons l'hypothèse d'une pente identique pour la 6G en partant de 0% à la date $t_{6G} - 1$. Selon une étude de 2020 (par Opensignal), les utilisateurs de la 5G consommaient 2,7 fois plus de données que les utilisateurs de la 4G. En 2020, il s'agissait d'adopteurs précoces de la technologie 5G, nous choisissons donc une valeur légèrement inférieure de 2. Dans le même esprit, nous choisissons un facteur 3 pour le ratio entre le volume consommé en 6G et le volume consommé en 4G. Nous formalisons maintenant cette approche.

On note $a_{\tau}^{(i)}(t) \in [0,1]$ le taux d'adoption de la technologie τ à la date t dans la zone i , c'est-à-dire la proportion de terminaux capables de communiquer avec la technologie τ . En supposant qu'un terminal 6G est capable de communiquer en 4G et en 5G et qu'un terminal 5G est capable de communiquer en 4G, nous avons $a_{4G} = 1$ et la proportion de terminaux supportant uniquement la 4G (resp. 5G) est $a_{4G} - a_{5G}$ (resp. $a_{5G} - a_{6G}$).

On note $b_{\tau}^{(i)}(t)$ le biais de trafic de la technologie $\tau \in \{5G, 6G\}$ par rapport à la 4G à la date t dans la zone i . On pondère le taux d'adoption de chaque technologie par son biais et obtient les proportions de trafic minimal par technologie suivantes :

$$\begin{aligned}\rho_{4G}^{(i)}(t) &= \frac{a_{4G}^{(i)}(t) - a_{5G}^{(i)}(t)}{A}, \\ \rho_{5G}^{(i)}(t) &= \frac{(a_{5G}^{(i)}(t) - a_{6G}^{(i)}(t))b_{5G}^{(i)}(t)}{A}, \\ \rho_{6G}^{(i)}(t) &= \frac{a_{6G}^{(i)}(t)b_{6G}^{(i)}(t)}{A},\end{aligned}$$

où on a supposé que quelques soient t et i , $a_{4G}^{(i)}(t) \leq a_{5G}^{(i)}(t) \leq a_{6G}^{(i)}(t)$ et $A = a_{4G}^{(i)}(t) + a_{5G}^{(i)}(t)(b_{5G}^{(i)}(t) - 1) + a_{6G}^{(i)}(t)(b_{6G}^{(i)}(t) - b_{5G}^{(i)}(t))$ est un facteur de normalisation. La variable $\rho_{\tau}^{(i)}(t)$ doit être interprétée comme la proportion de trafic générée par les terminaux de technologie τ incapables de communiquer en utilisant une technologie supérieure. La proportion $\rho_{4G}^{(i)}(t)$ ne peut être servie que par la 4G ; la proportion $\rho_{5G}^{(i)}(t)$ peut être servie en 4G ou en 5G ; la proportion $\rho_{6G}^{(i)}(t)$ peut être servie en 4G, 5G ou 6G. Les valeurs par défaut ne dépendent pas de la zone géographique. Les valeurs de biais par défaut ne dépendent pas non plus du temps.

Paramètre	Description	Valeur par défaut
-----------	-------------	-------------------

N_{OP}	Nombre d'opérateurs	4
V_o	Volume moyen de données consommées par habitant et par mois au temps t_o (en Go/mois)	20 (Arcep, 2023c) et voir « Annexe 2 – »
α_T	Facteur d'accroissement annuel du trafic de données	2.59 (Arcep, 2023c) et voir « Annexe 2 – »
ρ_{BH}	Proportion de données consommées à l'heure chargée	9,4 % (Arcep, 2023b)
$\rho_\tau^{(i)}(t)$	Proportion de trafic alloué à la technologie τ dans la zone géographique i à la date t	<i>Voir méthodologie</i>
$a_\tau^{(i)}(t)$	Taux d'adoption de la technologie τ dans la zone géographique i à la date t	Modèle affine 4G: $1 \forall t, i$ 5G: $0,2 \text{ à } t_0, 1 \text{ à } t_f \forall i$ 6G: $0 \text{ à } t_{6G} - 1 \forall i$ avec une pente de $(a_{5G}^{(i)}(t_0) - a_{5G}^{(i)}(t_f)) / (t_f - t_0)$
$b_\tau^{(i)}(t)$	Biais de trafic par rapport à la 4G de la technologie τ dans la zone géographique i à la date t	4G: $1 \forall t, i$ 5G: $2 \forall t, i$ 6G: $3 \forall t, i$

Tableau 2 - Description et caractérisation des variables liées à la demande de trafic dans le modèle
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Les contraintes de couverture. On prend en compte ici des contraintes de couverture en termes de superficie couverte, de population couverte et de nombre de sites à déployer à la date t . Ces contraintes peuvent résulter d'une stratégie de l'opérateur générique qui désire offrir une certaine qualité de service à ses abonnés. Elles peuvent également être imposées par le régulateur en lien avec l'obtention de certaines licences.

À la date t , on impose qu'une proportion $\beta_\tau^{(s)}(t)$ du territoire et une proportion $\beta_\tau^{(p)}(t)$ de la population soient couvertes par l'opérateur générique avec la technologie τ . Les modèles d'évolution dans le temps sont linéaires.

On impose également que 8000 sites 5G en 2024 et 10 500 sites 5G en 2025 soient déployés dans la bande 3,5 GHz (UPPER_MID) avec une proportion de 25 % de ces sites en zone rurale (Arcep, 2023a). Pour notre opérateur générique, on choisit de placer ces sites dans la zone RURAL_3. Les 75% de sites 5G restants à déployer le sont dans les zones les plus denses de PERI_URBAN_1 à URBAN_2.

Paramètre	Description	Valeur par défaut
$\beta_{\tau}^{(s)}(t)$	Proportion de la superficie qui doit être couverte par la technologie τ à la date t	Modèle linéaire 4G: 0,945 à t_0 , 0,99 à t_f 5G: 0,4 à t_0 , 0,945 à t_f 6G: 0 à $t_{6G} - 1$, 0,945 à t_f
$\beta_{\tau}^{(p)}(t)$	Proportion de la population qui doit être couverte par la technologie τ à la date t	Modèle linéaire 4G: 0,99 à t_0 , 0,99 à t_f 5G: 0,4 à t_0 , 0,98 à t_f 6G: 0 à $t_{6G} - 1$, 0,945 à t_f
$r_{5G,UPPER_MID}(t)$	Nombre minimal de sites 5G déployés dans la bande UPPER_MID	8000 pour $t = 2024$, 10 500 pour $t = 2025$
ρ_r	Proportion des sites 5G UPPER_MID imposés par la régulation déployés en zone rurale (RURAL_3)	0,25
$1 - \rho_r$	Proportion des sites 5G UPPER_MID imposés par la réglementation déployés en zones plus denses (PERI_URBAN_1, PERI_URBAN_2, URBAN_1, URBAN_2)	0,75

Tableau 3 - Description et caractérisation des variables liées à la couverture dans le modèle
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Les caractéristiques du réseau. Le trafic de données mobiles est servi par N_{Op} opérateurs identiques. Trois technologies sont potentiellement déployées : la 4G (LTE), la 5G (NR) et la 6G. Notons que nous excluons les technologies 2G et 3G de l'étude qui sont vouées à l'extinction dans un avenir proche (Arcep, 2023b). Les déploiements de la 4G et de la 5G sont possibles tout au long de la période étudiée, mais les déploiements de la 6G ne peuvent commencer qu'à la date t_{6G} . Les déploiements de petites cellules en ondes millimétriques commencent à t_{mmw} .

Fréquences, largeurs spectrales et refarming.

On considère $N_{band} = 4$ bandes de fréquences disponibles pour l'opérateur générique :

- La bande LOW agrège les bandes 700, 800 et 900 MHz actuellement utilisées par les opérateurs français. C'est une bande plutôt dédiée à la couverture.
- La bande LOWER_MID agrège les bandes 1800, 2100, 2600 MHz.
- La bande UPPER_MID agrège la bande 3,5 GHz actuellement disponible pour la 5G et la bande 6 GHz qui pourrait être rendue disponible pour la 6G. C'est une bande plutôt dédiée à la capacité.
- La bande HIGH représente les bandes millimétriques (par exemple à 26 GHz) ou sub-THz qui pourraient être rendues disponibles à l'avenir pour la 5G ou la 6G.

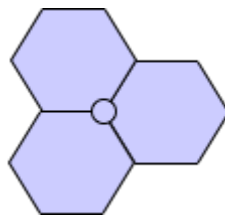
Une bande b est associée à une largeur de bande W_b . Pour les bandes existantes, cette largeur est égale à la moyenne des largeurs allouées aux opérateurs français en 2023². On suppose que

² Hypothèse à préciser pour la bande HIGH et pour la bande 6 GHz.

les bandes LOW et LOWER_MID peuvent faire l'objet d'un partage entre toutes les technologies (*refarming*). On suppose que la bande UPPER_MID peut faire l'objet d'un partage entre les technologies 5G et 6G. La largeur de bande UPPER_MID est la somme de la largeur de bande déjà allouée à 3.5GHz et de la largeur de bande qui pourraient être allouée à 6GHz. Dans le scénario de référence, l'opérateur générique se voit alloué 100MHz. Dans un scénario plus maximaliste, l'opérateur se voit alloué 200MHz³. On suppose que la 5G et la 6G ont leur propre bande HIGH qu'elles ne peuvent pas partager. Lorsqu'une bande b est partagée entre plusieurs technologies, la technologie τ se voit attribuer à la date t dans la zone géographique i une bande $W_{b,\tau}^{(i)}(t) = \rho_{\tau}^{(i)}(t)W_b$. La façon dont est calculée cette bande est détaillée dans la partie consacrée au dimensionnement capacitaire.

Notions de site, cellule et secteur.

On précise maintenant les notions de *site*, *cellule* et *secteur*. Un site est le lieu géographique de déploiement d'une station de base. Comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, un site est composé de plusieurs secteurs (trois sur la figure et N_{sect} en moyenne). Pour calculer le nombre moyen de secteurs par site, on considère que 80% des sites sont tri-sectorisés et que 20% des sites sont bi-sectorisés, c'est-à-dire $N_{sect} = 0,8 \times 3 + 0,2 \times 2$. Chaque secteur a la forme d'un hexagone régulier de rayon R et d'aire $S_{hexa}(R)$. Une cellule est définie comme un couple technologie/bande sur le secteur d'un site. Sur le secteur d'un site, plusieurs cellules peuvent donc se superposer géographiquement.



Il est également possible que plusieurs opérateurs se partagent un même site (on parle de mutualisation de site ou *site sharing*). On suppose ici qu'ils ne partagent pas leurs bandes et par conséquent leurs cellules. On définit $n_{sh}^{(i)}(t)$ comme étant le nombre moyen d'opérateurs par site dans la zone géographique i à la date t . Les valeurs par défaut sont celles obtenues en utilisant dans chaque zone géographique le pourcentage de partage passif observé dans la base ANFR pour les technologies 4G et 5G.

Paramètre	Description	Valeur par défaut
N_{tech}	Nombre de technologies de réseaux mobiles	3
N_{band}	Nombres de bandes de fréquences disponibles	4

³ Ces chiffres se fondent sur les discussions qui ont eu lieu à la CMR23. Le scénario de référence correspond au cas où la bande 6GHz est partagée avec le WiFi. Le scénario haut correspond au cas où les technologies IMT se verraient allouer toute la largeur de bande.

W_b	Largeur de bande pour la bande b en MHz	[23,74 ; 51,25 ; 177,5; 400] NB: la bande UPPER_MID inclut 77,5MHz à 3.5GHz et 100MHz à 6GHz
$W_{b,\tau}^{(i)}(t)$	Largeur de bande pour la technologie τ dans la bande b dans la zone i à la date t	Voir méthodologie
N_{sect}	Nombre moyen de secteurs par site	2,8
$n_{b,\tau}^{(i)}(t)$	Nombre de cellules déployées dans la zone i par l'opérateur générique par technologie τ et par bande b	Voir algorithmes
$n_{sh}^{(i)}(t)$	Nombre moyen d'opérateurs par site dans la zone i à la date t	[2.53 ; 2.53 ; 2,0 ; 1,82 ; 1,68 ; 1,54 ; 1.5, 1,37]
$R_\tau^{(i)}$	Rayon de cellule de la technologie τ dans la zone i dans la bande LOW	Voir tableau
$c_{b,\tau}(t)$	Capacité en Mbits/s/Hz d'une cellule supportant la technologie τ dans la bande b	Voir méthodologie
$C_{b,\tau}^{(i)}$	Débit en Mbits/s d'une cellule de la zone i supportant la technologie τ dans la bande b	Voir méthodologie
g_{5G}, g_{6G}	Gain en capacité de la 5G par rapport à la 4G et de la 6G par rapport à la 5G dans la même bande	1,06 ; 1,06
v_{max}	Charge maximale de la cellule à l'heure chargée	0,5

Tableau 4 - Description et caractérisation des variables liées aux caractéristiques du réseaux dans le modèle
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

On définit un rayon de cellule $R_\tau^{(i)}$ dans la bande LOW pour la zone géographique i et la technologie τ . Le rayon de portée d'une cellule est aussi le diamètre, ou deux fois la longueur du côté, de l'hexagone régulier défini précédemment. Ce rayon doit être compris comme un rayon moyen en absence de contraintes de capacité. Voir l'Annexe - Rayons de cellules pour la couverture pour la méthodologie et la discussion associée.

Rayons en km	4G/5G/6G
---------------------	-----------------

EMPTY	4,83
RURAL_1	4,83
RURAL_2	3,74
RURAL_3	2,67
PERI_URBAN_1	2,02
PERI_URBAN_2	1,51
URBAN_1	1,21
URBAN_2	0,97

Tableau 5 -Rayons de cellule considérés dans le cadre de cette étude

Capacité cellulaire.

On définit une capacité cellulaire $c_{b,\tau}$ en Mbits/s/MHz pour la technologie τ et la bande b . Les valeurs de certains couples (b, τ) sont données dans le tableau ci-dessous. Elles sont tirées d'une analyse présentée dans le cadre du « Grand dossier 5G » de l'Arcep (Coupechoux, M., 2020) et converties en Mbits/s/MHz selon le calcul donné dans le tableau. Elles font l'hypothèse d'une configuration MIMO 2T2R dans la bande LOW, 4T4R dans la bande LOWER_MID et 64T64R dans la bande UPPER_MID. Les valeurs des autres couples s'en déduisent en considérant un gain g_{5G} de la 5G sur la 4G et un gain g_{6G} de la 6G sur la 5G dans les mêmes bandes. Par exemple : $c_{LOW,6G} = c_{LOW,4G} \times g_{5G} \times g_{6G}$. La valeur de g_{5G} est tirée de l'analyse citée précédemment (Coupechoux, M., 2020). N'ayant pas d'information sur les gains de la 6G, on choisit la même valeur. Les capacités dans la bande HIGH n'ont pas besoin d'être définies dans notre modèle.

Configuration	Capacité cellulaire
4G LTE FDD LOWER_MID 2T2R	35.0/20 = 1.75 Mbits/s/MHz
4G LTE FDD LOWER_MID 4T4R	52.5/20 = 2.625 Mbits/s/MHz
4G LTE FDD LOW 2T2R	35.0*0.8/20 = 1.4 Mbits/s/MHz
5G NR TDD UPPER_MID 32T32R	463.0/80 = 5.7875 Mbits/s/MHz
5G NR TDD UPPER_MID 64T64R	643.0/80 = 8.0375 Mbits/s/MHz

Tableau 6 – Capacités cellulaires considérées dans le cadre de cette étude

Le dimensionnement du réseau est généralement fondé sur le trafic à l'heure chargée. Ce trafic à l'heure chargée est lui-même un trafic moyen calculé au cours d'une heure. Pour prendre en compte les variations du trafic au cours de l'heure chargée, il est d'usage de considérer une charge maximale v_{max} par cellule à ne pas dépasser à l'heure chargée. Il s'agit d'une marge qui permet de prendre en compte les variations au cours de cette heure. Dans le modèle, la capacité en Mbits/s/Hz offerte à l'heure chargée par une cellule de technologie τ dans la bande b s'écrit donc : $v_{max} \times c_{b,\tau}$. Le débit en Mbits/s offert par cette même cellule dans la zone géographique i à l'heure chargée s'écrit : $c_{b,\tau}^{(i)} = v_{max} \times c_{b,\tau} \times W_{b,\tau}^{(i)}$.

Règles de dépendances entre les technologies et les bandes

L'analyse de la base de données ANFR révèle que quel que soit l'opérateur, pour 90% des sites ou plus, il existe une relation de dépendance entre les couples (technologie, bande de fréquence) installés sur un site. On observe par exemple que le déploiement d'une cellule 5G dans la bande UPPER_MID implique quasi-systématiquement la présence d'une cellule 5G LOWER_MID sur ce même site. Le modèle permet donc de prendre en entrée une matrice de dépendances qui impose le déploiement de certaines cellules au cours du processus de planification. Les règles observées sont étendues à la 6G en utilisant la même logique. La matrice de dépendance par défaut, notée A est montrée ci-dessous. Lorsqu'il y a un "1" la coordonnée (i, j) , c'est-à-dire $A(i, j) = 1$, cela signifie qu'il y a au moins autant de cellules de couple (technologie, bande) j que de cellules de couple i dans une zone géographique donnée. Les cellules avec un astérisque "1*" sont remplacées par un 0 après l'introduction de la 6G. Lorsque le réseau est densifié pour des besoins capacitaires, les nouvelles cellules sont déployées avec le couple technologie/bande de capacités maximales disponible à l'année courante tout en respectant les règles de dépendance.

(τ, b)	4G LOW	4G LOWER_MID	5G LOW	5G LOWER_MID	5G UPPER_MID	6G LOW	6G LOWER_MID	6G UPPER_MID
4G LOW								
4G LOWER_MID	1							
5G LOW	1*	0						
5G LOWER_MID	1*	1*	1					
5G UPPER_MID	1*	1*	1	1				
6G LOW	1*	0	1	0	0			
6G LOWER_MID	1*	1*	1	1	0	1		
6G UPPER_MID	1*	1*	1	1	1	0	0	

Tableau 7 -Règles de dépendance appliquées entre les technologies et les bandes appliquées dans le cadre de cette étude

Le modèle de couverture

Le modèle de couverture consiste à appliquer une stratégie de déploiement de cellules afin de respecter les contraintes de couvertures en termes de superficie du territoire national, de population couverte et de nombre de sites imposés par le régulateur. Le modèle repose sur la stratégie suivante pour l'opérateur générique : la couverture est assurée uniquement grâce à la bande LOW et les parties du territoire non couvertes se trouvent dans les zones géographiques les moins denses. Le modèle prend en entrées les contraintes de couverture, les rayons de cellules dans la bande LOW, les caractéristiques des zones géographiques (superficie et population) et les contraintes imposées par la réglementation dans la bande UPPER_MID. En sortie, il fournit le nombre de cellules dans les bandes LOW et UPPER_MID pour chacune des technologies et chacune des zones.

Un traitement spécifique est appliqué pour la bande HIGH. On fait en effet l'hypothèse que ces fréquences ne seront déployées que sur de petites cellules placées dans des zones urbaines très denses (par exemple dans des gares, aéroports, sites touristiques ou centres commerciaux). Ces

petites cellules n'ont pas pour but d'assurer la couverture du service, ni de décharger le réseau de macro-cellules. Elles sont plutôt destinées à assurer une expérience de très haut débit à l'utilisateur, de manière très localisée dans un environnement extérieur (*outdoor*) ou à l'intérieur des bâtiments (*indoor*). Le nombre de ces petites cellules est calculé en utilisant un ratio moyen par rapport au nombre de macro-cellules dans les zones URBAN_1 et URBAN_2. Selon les scénarios, on considère un ratio variant de 0,1 à 1 en 2035 avec une croissance linéaire à partir de l'introduction des ondes millimétriques, voir l'Annexe - Discussion sur le déploiement des petites cellules en ondes millimétriques.

Algorithme pour la bande LOW

Pour chaque année t , pour chaque technologie τ et pour la bande $b = \text{LOW}$:

- 1) Calculer la population qui doit être couverte : $P(t) \times \beta_{\tau}^{(p)}(t)$ et la population qui ne sera pas couverte : $P(t) \times (1 - \beta_{\tau}^{(p)}(t))$
- 2) Calculer la superficie qui doit être couverte : $A_S = S \times \beta_{\tau}^{(s)}(t)$
- 3) Itérativement en commençant par les zones les moins denses : retrancher de la population de la zone i la population qui ne sera pas couverte et convertir cette population en surface en utilisant la densité de la zone $p_i(t) \div s_i$. On obtient une superficie du territoire A_P qui doit être couverte pour respecter la contrainte de couverture de la population.
 - Si $A_P > A_S$: la contrainte de population est limitante. Mettre à jour les superficies s_i en prenant en compte les contraintes de couverture de la population.
 - Sinon, la contrainte de superficie est limitante. Itérativement en commençant par les zones les moins denses, retrancher de la superficie de la zone i la superficie qui ne sera pas couverte. Mettre à jour les superficies s_i en prenant en compte les contraintes de superficie.
- 4) La superficie qui doit finalement être couverte pour respecter les contraintes de couverture en termes de population et de superficie est : $A = \max(A_P, A_S)$.
- 5) Pour chaque zone, calculer le nombre nécessaire de cellules pour respecter la contrainte de couverture en imposant un nombre croissant de cellules au cours du temps :

$$n_{b,\tau}^{(i)}(t) = \max(s_i \div S_{hexa}(R_{\tau}^{(i)}), n_{b,\tau}^{(i)}(t-1))$$

où $b = \text{LOW}$ et les s_i ont été mis à jour en fonction de la contrainte limitante à l'étape 3).

Pour la bande UPPER_MID, l'algorithme prend en compte les contraintes réglementaires concernant la 5G.

Algorithme pour la bande UPPER_MID.

Pour chaque année t , pour la bande $b = \text{UPPER_MID}$ et pour la technologie $\tau = 5G$:

- Si le nombre de cellules déjà déployées dans la zone RURAL_3 est inférieur aux contraintes de la réglementation, c'est-à-dire si $n_{\tau,b}^{(\text{RURAL}_3)}(t-1) \leq r_{\tau,b}(t) \times N_{sect} \times \rho_r$, on ajoute de nouvelles cellules : $n_{\tau,b}^{(\text{RURAL}_3)}(t) = r_{\tau,b}(t) \times N_{sect} \times \rho_r$
- Si le nombre de cellules déjà déployées dans les zones PERI_URBAN_1, PERI_URBAN_2, URBAN_1, URBAN_2 est inférieur aux contraintes de la réglementation, c'est-à-dire si

$$\sum_{i=PERI_URBAN_1}^{URBAN_2} n_{\tau,b}^{(i)}(t-1) \leq r_{\tau,b}(t) \times N_{sect} \times (1 - \rho_r)$$

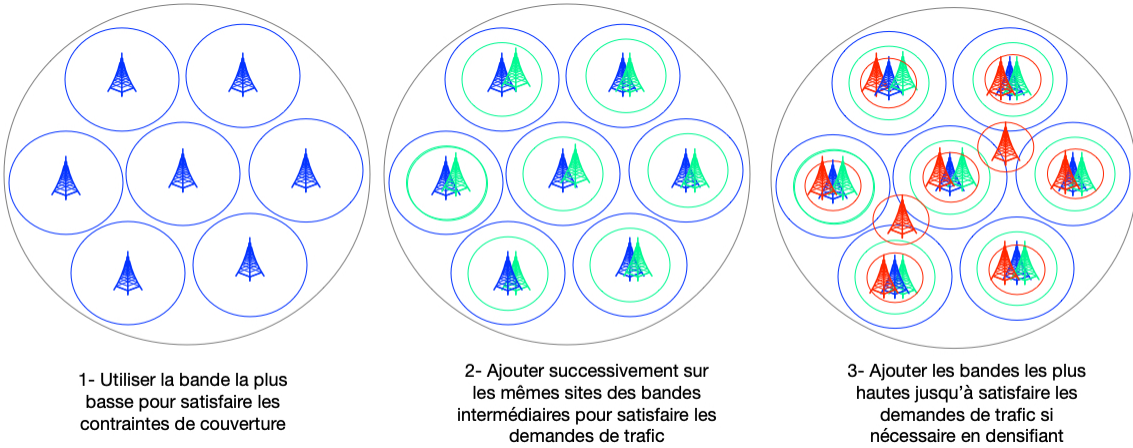
alors on répartit les cellules en proportion de la population dans les zones denses :

$$n_{\tau,b}^{(i)}(t) = r_{\tau,b}(t) \times N_{sect} \times (1 - \rho_r) \times p_i(t) \div \sum_{i=PERI_URBAN_1}^{URBAN_2} p_i(t)$$

On obtient donc en sortie du modèle de capacité le nombre de cellules $n_{LOW,\tau}^{(i)}(t)$ à déployer à la date t pour chacune des technologies dans chacune des zones dans la bande LOW ainsi que le nombre de cellules $n_{UPPER_MID,5G}^{(i)}(t)$ à déployer à la date t pour la 5G dans la bande UPPER_MID.

Le modèle de capacité

Le modèle de capacité consiste à ajouter des cellules pour écouler la demande de trafic de données mobiles. La stratégie de déploiement consiste à positionner au maximum les nouvelles cellules sur les sites existants et à ne densifier que si nécessaire. Elle est illustrée sur la figure ci-dessous. Dans une zone géographique donnée, on a supposé que le trafic est distribué de manière uniforme dans l'espace. On impose donc qu'à l'étape 2, l'ajout d'une bande soit fait sur tous les sites existants.



Algorithme de calcul du nombre de cellules à largeur de bande constante dans la zone i à la date t .

On ordonne les couples (b, τ) d'abord selon la technologie puis, à technologie égale, selon la bande croissante. Dans cet algorithme, les valeurs $W_{b,\tau}^{(i)}$ sont données.

Pour chaque technologie τ :

- On note $N_{cov} = n_{LOW,\tau}^{(i)}(t)$ le nombre de cellules de la technologie τ avec la bande LOW utilisées pour la couverture.
- Calculer la capacité cellulaire dans chaque bande b en Mbits/s :

$$C_{b,\tau}^{(i)} = v_{max} \times c_{b,\tau} \times W_{b,\tau}^{(i)}$$

- Calculer la demande de trafic des terminaux jusqu'à la technologie τ ainsi que le trafic résiduel après déploiement des cellules de couverture et réglementaires :

$$D_{\tau}^{(i)} := \sum_{t \leq \tau} T_t^{(i)}$$

$$D_{\tau}^{(i)} := D_{\tau}^{(i)} - \sum_{t \leq \tau} C_{LOW,\tau}^{(i)} n_{LOW,\tau}^{(i)} - \sum_{t \leq \tau} C_{UPPER_MID,\tau}^{(i)} n_{UPPER_MID,\tau}^{(i)}$$

- Tant que le trafic résiduel est strictement positif, considérer les (t, b) de manière croissante, $LOW < b < HIGH$, $t \leq \tau$:
 - Ajouter N_{cov} cellules de type (t, b) :

$$n_{b,t}^{(i)} := n_{b,t}^{(i)} + N_{cov}$$

- Mettre à jour les nombres de cellules $n_{b,t}^{(i)}$ et le trafic résiduel :

$$D_{\tau}^{(i)} := D_{\tau}^{(i)} - C_{b,t}^{(i)} n_{b,t}^{(i)}$$

- Si le trafic résiduel est strictement positif (on a atteint $t = \tau$ et la bande la plus haute à l'itération précédente), on densifie la zone. Tant que le trafic résiduel est strictement positif :

- Ajouter N_{cov} cellules de type (τ, b) , où b est la bande la plus haute telle que $b < HIGH$:

$$n_{b,\tau}^{(i)} := n_{b,\tau}^{(i)} + N_{cov}$$

- Pour tout couple (t, b') dépendant de (τ, b) , i.e., telle que $A(\tau, b, t, b') > 0$, où A est la matrice de dépendances, ajouter N_{cov} cellules de type (t, b') :

$$\forall (t, b') \mid A(\tau, b, t, b') > 0, n_{b',t}^{(i)} := n_{b',t}^{(i)} + N_{cov}$$

- Mettre à jour le trafic résiduel :

$$D_{\tau}^{(i)} := D_{\tau}^{(i)} - C_{b,\tau}^{(i)} n_{b,\tau}^{(i)} - \sum_{(t,b') \mid A(\tau,b,t,b') > 0} C_{b',t}^{(i)} n_{b',t}^{(i)}$$

Algorithme d'optimisation de la largeur de bande dans la zone i à la date t

Dans cet algorithme, on détermine les valeurs $W_{b,\tau}^{(i)}(t)$, le nombre de cellules $n_{b,\tau}^{(i)}(t)$ étant donné pour tout b et tout τ .

- On fixe un poids $w_{5G} = 1$ pour la 5G et un poids $w_{6G} = 2$ pour la 6G. Ces poids permettent de favoriser une technologie par rapport à l'autre dans le programme linéaire.
- On fixe la variation maximale de bande par année ΔW .
- Résoudre le programme linéaire suivant :

$$\text{maximiser } \sum_b (w_{5G} W_{b,5G}^{(i)}(t) + w_{6G} W_{b,6G}^{(i)}(t))$$

variables de décision :

$$\forall (b, \tau) : W_{b,\tau}^{(i)}(t)$$

sous contraintes :

$$(1) \forall (b, \tau) : 0 \leq W_{b,\tau}^{(i)}(t)$$

$$(2) \forall (b, \tau) : W_{b,\tau}^{(i)}(t-1) - \Delta W \leq W_{b,\tau}^{(i)}(t) \leq W_{b,\tau}^{(i)}(t-1) + \Delta W$$

$$(3) \forall b, \sum_{\tau} W_{b,\tau}^{(i)}(t) = W_b$$

$$(4) T_{4G}^{(i)}(t) \leq \sum_b n_{b,4G}^{(i)}(t) C_{b,4G}^{(i)}(t) W_{b,4G}^{(i)}(t)$$

$$(5) T_{5G}^{(i)}(t) \leq \sum_{\tau \in \{4G, 5G\}} \sum_b n_{b,\tau}^{(i)}(t) C_{b,\tau}^{(i)}(t) W_{b,\tau}^{(i)}(t)$$

$$(6) T^{(i)}(t) \leq \sum_{\tau} \sum_b n_{b,\tau}^{(i)}(t) C_{b,\tau}^{(i)}(t) W_{b,\tau}^{(i)}(t)$$

Une fois que l'on a calculé le nombre de cellules dans chaque zone, pour chaque technologie et chaque bande, il faut déterminer le nombre de sites et leur configuration. La configuration d'un site est un ensemble de cellules caractérisées par un couple technologie/bande (b, τ) . L'idée de l'algorithme est de co-situer au maximum les cellules à déployer.

Algorithme de calcul des configurations de sites.

Pour chaque zone i :

- Déterminer l'ensemble Φ des couples technologie/bande (b, τ) dont le nombre de cellules est non nul et classer ces couples par valeurs croissantes de $n_{b,\tau}^{(i)}(t)$.
- Pour chaque couple $(b, \tau) \in \Phi$, considéré en ordre croissant de $n_{b,\tau}^{(i)}(t)$:
 - $n_{b,\tau}^{(i)}(t) \div N_{sect}$ est le nombre de sites ayant toutes les technologies et bandes présentes dans Φ .
 - Retirer (b, τ) de Φ .

En sortie de l'algorithme, on obtient pour chaque zone géographique une liste de configurations de sites et leur nombre.

Le modèle environnemental

Chaque site accueille des équipements permettant de faire fonctionner ses différentes cellules et de transmettre ou recevoir les données du réseau cœur. On compte le nombre d'équipements en fonction de la configuration de ses cellules de la manière suivante (les valeurs se cumulent en fonction de la configuration du site) :

Antennes :

- Les sites ayant des cellules dans les bandes « LOW » et « LOWER_MID » ont 1 antenne passive par secteur (2T2R pour la bande « LOW », 2T2R ou 4T4R pour la bande « LOWER_MID »). Ces antennes passives sont capables de transmettre et recevoir dans l'ensemble des bandes considérées quelle que soit la technologie ;
- Les sites ayant des cellules dans les bandes « UPPER_MID » ont 1 antenne active AAU MIMO 64T64R par secteur. Ces antennes actives intègrent les amplificateurs

de puissance et n'ont donc pas besoin de RRU associé. Elles sont partagées par la 5G et la 6G ;

- Les sites ayant des cellules dans la bande « HIGH » ont 1 antenne active AAU MIMO 64T64R ;

RRU (*Remote radio unit*) :

- Les sites ayant des cellules dans la bande « LOW » ont 1 RRU dual-bande 2T2R par secteur ;
- Les sites ayant des cellules dans la bande « LOWER_MID » ont 1 RRU tri-bande 4T4R par secteur ;

BBU (*Baseband unit*) :

- Les sites ayant des cellules dans les bandes « LOW » et « LOWER_MID » ont 1 BBU ;
- Les sites ayant des cellules dans la bande « UPPER_MID » ont 1 BBU ;
- Les sites ayant des cellules dans la bande « HIGH » ont 1 BBU.

Système de transmission vers le réseau cœur (*backhaul*) : Chaque site est équipé d'un routeur. Les sites sont connectés au réseau de transport soit par un accès optique, soit par un accès par faisceau hertzien (FH). Dans le premier cas, le site possède 1 unité de réseau optique (Optical Network Unit). Dans le second cas, le site possède 1 carte de gestion de la transmission FH ainsi que 1 antenne FH. Par soucis de simplicité et de manque de données, dans nos simulations 100% des sites sont raccordés via la première option. De plus, les fibres optiques reliant le site au réseau cœur et leur installation ne sont pas comptabilisées.

Alimentation électrique : chaque site possède un bloc d'alimentation électrique et un convertisseur AC/DC.

Chaque site possède 1 support, potentiellement partagé entre plusieurs opérateurs, et dont la nature et taille dépend de la zone.

Sur la base de ces règles, de la durée de vie de chacun des équipements⁴, et du nombre de cellules et de sites en sortie du modèle capacitaire, modèle environnemental maintient à jour un inventaire par année et par zone des équipements avec leur âge respectifs. Cet inventaire est ensuite utilisé pour calculer :

- L'empreinte carbone embarquée des équipements due à leur phase de production, sur la base de leurs analyses de cycle de vie respectives ;
- La consommation d'électricité de l'infrastructure en phase d'opération sur la base de la modélisation des profils de consommation des équipements ;
- L'empreinte carbone totale de la phase d'opération, obtenue par application de facteurs d'émissions de la production d'électricité en France, projetés entre 2024 et 2035 dans un scénario de transformation du mix électrique national vers la décarbonation⁵.

Modèle de renouvellement des équipements

⁴ Le détail sur les durées de vie pour chaque équipement sont accessibles au sein du modèle environnemental construit dans le cadre de ce rapport (The Shift Project, 2024b, Modèle environnemental).

⁵ Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des modélisations réalisées par l'Arcep sur les réseaux mobiles 4G et 5G (Arcep, 2022).

Le renouvellement des équipements est pris en compte sous la forme d'un modèle dynamique stock-flux de la forme :

$$I_e(t) = \Delta I_e(t) \cup \left(\bigcup_{t'=0}^t I(t') \theta_e(t - t') \right) ,$$

où $I_e(t)$ dénote le stock d'un équipement de type e au temps t , ΔI_e représente les nouveaux équipements des nouveaux déploiement, et θ_e modélise la distribution de durée de vie. Nous avons pris une distribution log-normale d'écart-type relatif de 30%. Comme notre simulation ne démarre qu'en 2012 et qu'un grand nombre de sites 4G ou 5G ont été installé sur des supports existant, ce modèle est initialisé avec 30 000⁶ supports répartis entre 2020 et 2012.

Modèle de consommation énergétique

La consommation électrique des équipements est modélisée en une part fixe, dépendant uniquement des caractéristiques de l'équipement, et une part variable, également proportionnelle au trafic transitant par la cellule. Ce calcul prend en compte l'âge des équipements. En effet, **l'efficacité énergétique des équipements** d'une technologie donnée s'améliore au fil des renouvellement d'équipements, à la fin de leur durée de vie.

Pour les RRU et AAU, nous avons adapté de modèle de puissance du projet EARTH (Auer et al., 2011) développé en 2011 afin de pouvoir mieux reproduire les profils de consommation des équipements plus récents. La puissance P_r en Watt d'un RRU ou AAU dépend de :

- Du taux de charge l entre 0 et 1. (*variable*)
- Du nombre $N_{tx}(b)$ de transmetteurs MIMO pour la bande b (de 2 à 64). (*donnée d'entrée*)
- De la puissance $P_{tx}(b)$ d'un transmetteur pour la bande b . (*donnée d'entrée, variable en fonction des gains d'efficacité énergétique*)
- De la puissance d'émission $P_{out}(b)$ pour la bande b . Celle-ci est fixée à 240W pour la bande UPPER_MID (Ahmed A. & Coupechoux M., 2023), 50 W pour la bande HIGH, et pour les bandes LOW et LOWER_MID, celle-ci est calculée en allouant 2 W par MHz de largeur de bande et de transmetteurs :

$$\circ P_{out}(b) = 2 N_{tx}(b) W_b^{(i)}$$

- Du facteur d'efficacité de puissance η_b entre 0 et 1. (*donnée d'entrée, variable en fonction des gains d'efficacité énergétique*)
- Du coefficient de perte σ_{feed} entre l'amplificateur de puissance et l'antenne : 0.2 pour les RRU et 0 pour les AAU (Ahmed and Coupechoux, 2023)
- De la puissance de base $P_{base}(b)$. (*donnée d'entrée*)

Ce qui donne le modèle affine suivant :

$$P_r(l, b) = P_{base}(b) + N_{tx}(b)P_{tx}(b) + l \frac{P_{out}(b)}{\eta_b (1 - \sigma_{feed}(b))}$$

Ce modèle affine permet de calculer la consommation énergétique annuelle directement à partir du taux de charge moyen $lb(i)$ par zone i . Il est calculé à partir du ratio entre le trafic moyen réparti entre les bandes et la capacité disponible par bande.

Les coefficients $P_{base}(b)$, $P_{tx}(b)$, et η_b sont tirés de (Ahmed and Coupechoux, 2023) pour les AAU de la bande UPPER_MID, et ont été obtenu par régression linéaire de données de puissances de différents modèles de RRU de 2012 à 2023 et présentant des caractéristiques diverses (simple

⁶ Ce chiffre a été estimé à partir de l'analyse de la base ANFR.

ou multi bande, 2T2R et 4T4R). Pour les AAU des micro-cellules la bande HIGH, par manque de données fiables, nous avons choisi des paramètres reproduisant un profil de puissance variant linéairement de 100W (charge à 0%) à 300W (charge à 100%) comment un compromis entre les modèles théoriques de la littérature académique (Birari, N., 2022; Despois, T., 2020) et les puissances maximales recommandées par les constructeurs pour l'alimentation électrique de certains de leurs modèles correspondant à notre cas d'usage.

	LOW	LOWER_MID	UPPER_MID	HIGH
P_{base}	100	100	230	100
P_{tx}	12.5	35	1	0
η	0.36	0.33	0.25	0.25

Tableau 8 – Modèle de consommation énergétique

La puissance P_{BBU} des BBU est considérées constantes avec $P_b = 100$ W, auxquels nous ajoutons une base commune de 100 W (sauf pour les micro-cellules). La puissance P_{ONU} de l'ONU de liaison est considérée à 20W.

Finalement nous considérons également les pertes de l'alimentation σ_{PSU} et des convertisseurs σ_{DC} pour arriver à la consommation finale totale :

$$E = 365 \times 24 \times \frac{100 \times n_{site} + n_{BBU} \times P_{BBU} + \sum_{i,b} n_b^{(i)} P_r(l_b^{(i)}, b)}{(1 - \sigma_{PSU})(1 - \sigma_{DC})}$$

Modèle de l'empreinte carbone embarquée des équipements

Les calculs d'empreinte carbone embarquée sont effectués selon une approche empreinte. Ils sont calculés via deux approches complémentaires :

L'approche basée « stock », dans laquelle les émissions embarquées des équipements sont amorties sur leur durée de vie ;

L'approche basée « flux », dans laquelle les impacts des nouveaux équipements (renouvellement des vieux équipements et nouveaux déploiements) sont intégralement imputés à l'année du déploiement.

Faute de données constructeurs, les facteurs d'émissions embarquées des équipements composant les stations de base ont été estimés à partir du travail de master de Maël Madon avec Ericsson et des caractéristiques de certains équipements fournit dans le rapport UTAMO (Stobbe, L. et al., 2023). Les facteurs estimés incluent pour la majorité d'entre eux l'extraction des matières premières, fabrication, assemblage, emballage et le transport.

Nous avons considéré trois types de supports : « grand » et « moyen » tous deux formés d'une dalle béton et structure acier, et le type « léger » formé d'une structure acier uniquement. La répartition entre les zones est donnée par le tableau suivant dont le ratio entre les deux premiers types et le type « léger » provient d'une analyse de la base ANFR.

Zone	Grand	Moyen	Léger
empty	90%		10%
rural_1	90%		10%
rural_2	86%		14%

rural_3	74%		26%
peri_urban_1		65%	35%
peri_urban_2		40%	60%
urban_1		20%	80%
urban_2		4%	96%

Tableau 9 – Modèle d'empreinte embarquée

Le détail des valeurs du modèle de puissance, des facteurs d'émissions embarquées, et de leurs évolutions temporelles traduisant de gain de miniaturisation et gain d'efficacité énergétique sont disponibles dans le fichier equipements.xlsx (The Shift Project, 2024b).

Annexe 2 – Description des zones géographiques

Zone	Superficie (km2)	Population	Densité moyenne (en hab/km ²)
EMPTY	9 543	0	0
RURAL_1	298 628	4 937 016	17
RURAL_2	143 770	6 366 358	44
RURAL_3	81 565	9 938 064	122
PERI_URBAN_1	17 255	8 554 409	496
PERI_URBAN_2	9 839	9 801 934	996
URBAN_1	3 408	14 818 402	4 348
URBAN_2	646	8 520 702	13 190
Total	564 654	62 936 885	

Tableau 10 – Statistiques en superficies et population des zones
Source : The Shift Project, à partir de (INSEE, 2023)

Annexe 3 - Rayons de cellules pour la couverture

Notre modèle de planification commence par une phase de couverture du territoire en fonction d'objectifs en termes de surface et de population couvertes. À cet effet, nous nous appuyons sur des rayons de cellules typiques dans la bande LOW qui nous permettent de calculer le nombre de cellules nécessaires pour couvrir un territoire. Or il y a une certaine difficulté à déterminer ces rayons typiques tant les environnements sont variés, chaque environnement étant caractérisé par un type de propagation radio.

La première approche consiste à s'appuyer sur des modèles théoriques. Les modèles classiques sont Hata Quasi Open (HQO) [ref] et 3GPP RMa pour les zones rurales et 3GPP UMa [ref] pour les zones urbaines. On effectue alors un bilan de liaison dont les valeurs sont reprises de [Coupechoux ARCEP] avec une marge d'interférence réduite à 1 dB pour simuler l'absence de contrainte de capacité et un débit en bordure de cellule de 500 kbps. Avec ce bilan, on détermine le rayon de cellule sur la voie montante pour les fréquences extrêmes de la bande LOW, à savoir 700 MHz et 900 MHz.

On peut aussi estimer le rayon des cellules en étudiant la valeur moyenne des distances inter-sites dans la base ANFR. Le travail a été effectué pour les technologies LTE 700 MHz et LTE 800 MHz de l'opérateur Orange dans les différentes zones géographiques de l'étude et au cours du temps à partir de 2014. Le choix de 2014 est fondé sur le fait que les premiers déploiements dans la bande 800 MHz commencent mi-2013 en France métropolitaine.

Mais cette analyse n'est pas à elle seule suffisante non plus. En effet, en zone dense, le déploiement des sites est essentiellement régi par des contraintes de capacité, les rayons observés ne correspondent donc pas à des rayons typiques adaptés à la couverture et contraints par la propagation radio. En zone très peu dense, la couverture des opérateurs n'est pas forcément complètement continue et par conséquent, là encore, les rayons observés peuvent induire en erreur. Dans les zones intermédiaires, il est difficile de savoir si le déploiement est contraint par la couverture ou la capacité. Enfin la taille de la cellule dépend du débit offert en bordure de cellule, donnée non disponible.

Dans les figures ci-dessous, on voit qu'il n'existe pas de modèle de propagation théorique qui soit suffisamment précis pour capturer la diversité des situations. Le modèle HQO semble donner le bon ordre de grandeur pour les zones RURAL_1 et RURAL_2. Le modèle RMa semble adapté aux zones PERI_URBAN_1 et PERI_URBAN_2, le modèle UMa aux zones URBAN_1 et URBAN_2.

Dans notre modèle, nous choisissons des valeurs plutôt récentes pour les zones rurales avec l'idée que la couverture quasi-totale est récente ou en cours de réalisation (voir figure de gauche). Dans les zones plus denses, nous choisissons une valeur plutôt ancienne avec l'idée que la couverture continue a été vite atteinte et que les déploiements suivants ont permis d'augmenter la capacité du réseau (voir figure de droite). La zone EMPTY étant très peu couverte en pratique, nous réutilisons la valeur de la zone RURAL_1.

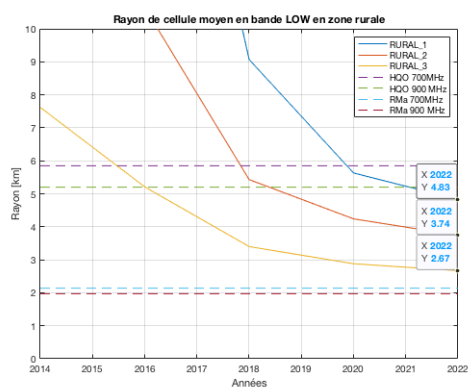


Figure 1 - Rayon de cellule en bande LOW en zone rurale)

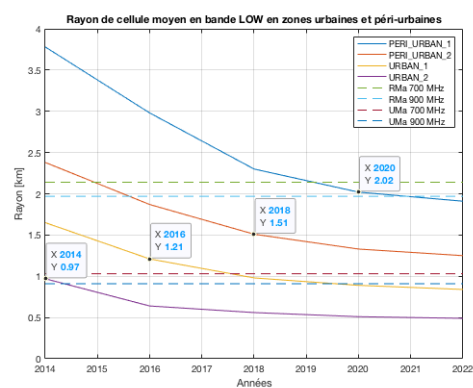


Figure 2 - Rayon de cellule en bande LOW en zones urbaine et péri-urbaine (à droite)

Annexe 4 – Discussion sur le déploiement des petites cellules en ondes millimétriques

D'après (GSMA, 2022), les principaux cas d'usage des petites cellules en ondes millimétriques sont la couverture en extérieur de zones de fort trafic (*outdoor hotspots*), l'intérieur des bâtiments publics (gares, aéroports, stades, centres commerciaux, etc.), les réseaux privés (usines, entrepôts, bureaux, ports, etc.) et l'accès Internet large bande (usage fixe). Dans notre modèle, les cas d'usage ne sont pas détaillés et seul un ratio entre petites cellules et cellules macro « UPPER_MID » dans la zone urbaine dense du modèle est pris en compte comme cela a déjà été fait dans (Citizing, 2020; HCC, 2020) et (Stobbe, L. et al., 2023).

Le rapport du Haut Conseil pour le Climat de 2020 (Citizing, 2020; HCC, 2020) considère 10 cellules en ondes millimétriques pour couvrir la surface couverte par 1 macro-site en zone très dense. Nous retenons ce chiffre comme borne supérieure, les petites cellules n'étant pas destinées à offrir une couverture complète de la zone et toutes les cellules macro n'étant pas destinées à être associées à des petites cellules, même en zone très dense. En 2030, l'étude obtient 89000 sites à 26 GHz pour un total de 210000 sites (de macro-cellules), soit un ratio d'environ 0,4.

Le rapport UTAMO (Stobbe, L. et al., 2023) considère qu'en 2030 0,33 % du territoire national allemand sera couvert en *outdoor* par ces petites cellules, et dix fois moins en *indoor* (par opérateur). Cela correspond à 857 000 sites pour 108 000 sites macro (toutes technologies confondues), soit un ratio d'environ 8 petites cellules pour un site macro à l'échelle nationale.

En Corée du Sud, le spectre 28 GHz a été désalloué en 2022 et en 2023 à cause d'un manque d'investissement des opérateurs (Kim et al., 2023; ZDNet, 2022) puis réalloué à un nouvel opérateur en 2024. Celui-ci a prévu un déploiement de 6000 sites lors des trois premières années (Lightreading, 2024).

Pour les États-Unis, on ne dispose pas de chiffres précis concernant le déploiement des cellules en ondes millimétriques. On sait qu'il y avait en 2022, 1 199 600 petites cellules pour 209 500 sites macro soit un ratio de 5,7 à l'échelle nationale (WIA, 2023), mais ce compte inclut toutes les technologies et ne différencie pas les petites cellules à ondes millimétriques.

Le Japon est considéré comme un marché à succès pour les ondes millimétriques. On y dénombre 61 629 stations de base 5G dans les bandes sous 6GHz et 25 884 stations de bases 5G à ondes millimétriques début 2023 (Qualcomm Japan, 2023), soit un ratio de 0,4 (mais seulement pour la 5G).

Au regard de ces chiffres, notre modèle fait une hypothèse plutôt conservatrice si les petites cellules en ondes millimétriques venaient à être déployées en France. Nous retenons pour 2030 le ratio de 0,4 petites cellules par cellule macro 5G dans la bande « UPPER_MID », mais, contrairement au cas japonais, seulement dans les zones URBAN_1 et URBAN_2.

Annexe 5 – Comparaison avec l'infrastructure réseau métropolitaine actuelle

Pour valider notre modèle et ses hypothèses, nous avons comparés les sorties de notre simulation de 2012 à 2023 avec les données de la base ANFR sur les sites 4G et 5G des quatre opérateurs principaux en France métropolitaine. Nous pouvons voir sur la figure 19 que les ordres de grandeurs sont proches. Pour les premières années (2012 à 2017), nous pouvons observer que notre modèle déploie significativement moins de cellules capacitaire 4G LOWER_MID que les opérateurs. Ceci s'explique par le fait que défaut, notre modèle tend à déployer un réseau « sobre » en ne déployant uniquement dans la bande LOW pour la couverture. Les bandes capacitaires sont introduites soit pour répondre à la demande, soit par les contraintes de régulation, mais nous faisons démarrer celle-ci en 2020 seulement car nous prenons en compte uniquement les règles liées aux licences 5G. De plus, par construction de notre modèle, celui-ci montre des effets de seuil plus important que la réalité (principalement à cause de l'hypothèse d'homogénéité des zones). Cet effet est particulièrement visible entre 2020 et 2021, et donc il est possible que notre modèle soit simplement légèrement « en avance » par rapport aux déploiements présents et à venir. Pour les années 2021 à 2023 notre simulation génère légèrement plus de sites-opérateur que la base ANFR, mais légèrement moins qu'une situation où les quatre opérateurs posséderaient une infrastructure similaire à l'opérateur Orange (colonne de droite).

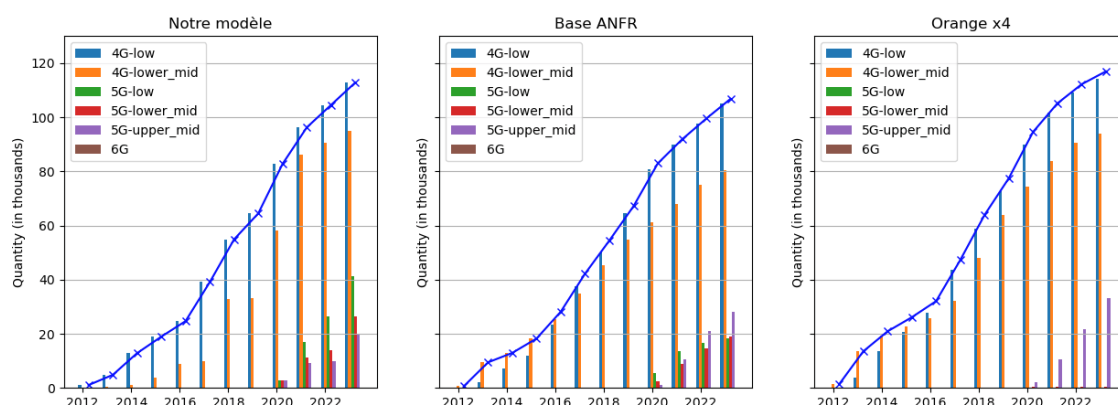


Figure 3 - Nombre de sites-opérateurs décomposés par années et par type de technologie et bande déployée pour notre modèle, la base ANFR, et une extrapolation à 4 opérateurs de l'infrastructure de l'opérateur Orange.

La figure 20 compare les estimations de consommation énergétique de notre modèle avec les données des 4 opérateurs principaux (Arcep, 2023). Nous pouvons observer une légère surestimation pour l'année 2021 qui peut s'expliquer par 1), un nombre légèrement supérieur de sites (figure 19), 2) une non prise en compte du mois de déploiement (un site déployé en fin

d'année dans le monde réel comptera pour 365 jours de consommation électrique dans notre simulation), et 3) par le fait que nous déployons des sites avec systématiquement l'ensemble des bandes LOWER_MID, alors que dans les données ANFR, les trois bandes 1800, 2100 et 2600 ne sont pas systématiquement déployées ensemble. De plus, notons qu'une extrapolation de la consommation énergétique du RAN de l'opérateur Orange (Bou Rouphael, R. et al., 2023) à quatre opérateurs qui seraient identiques donne une consommation supérieure à notre simulation. Toutes ces observations semblent donc valider le fait qu'à la fois le modèle de génération des sites et le modèle de consommation énergétique reproduisent des ordres de grandeur suffisamment bons vis-à-vis des analyses que nous en faisons.

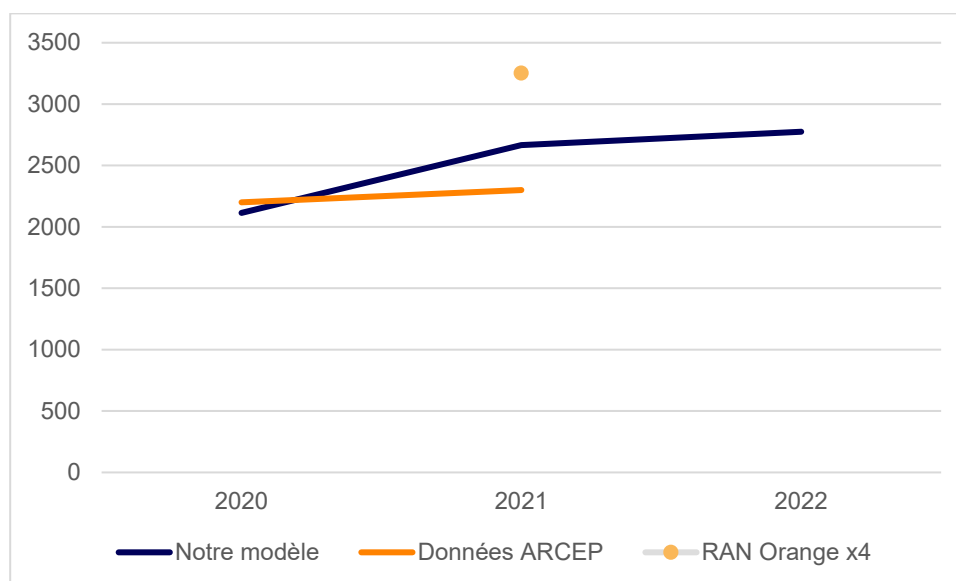


Figure 4 – Consommations électriques annuelles pour notre modèle, les données ARCEP, et le RAN de l'opérateur Orange extrapolé à 4 opérateurs (Bou Rouphael, R. et al., 2023).

Annexe 6 – Modélisation réseaux mobiles : figures et données complémentaires

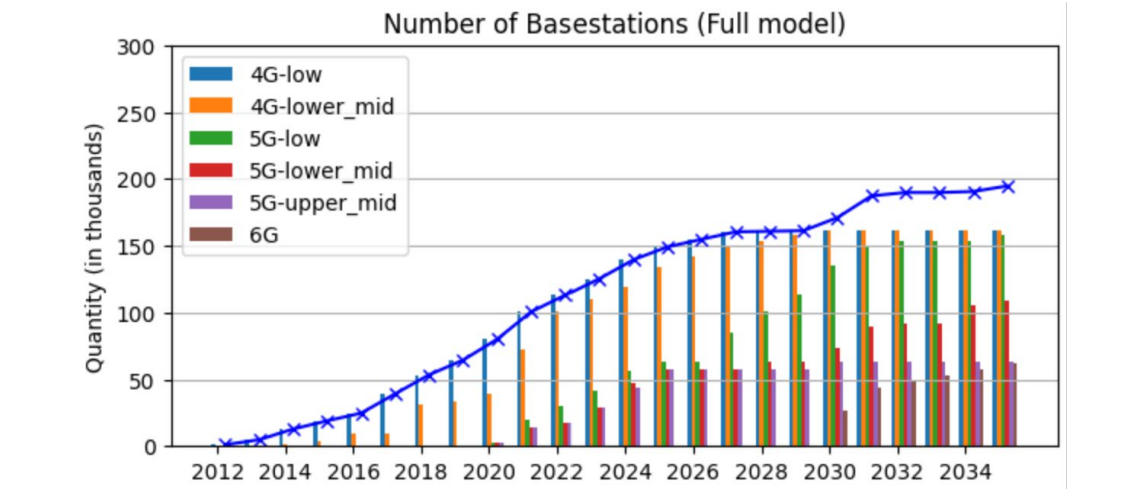
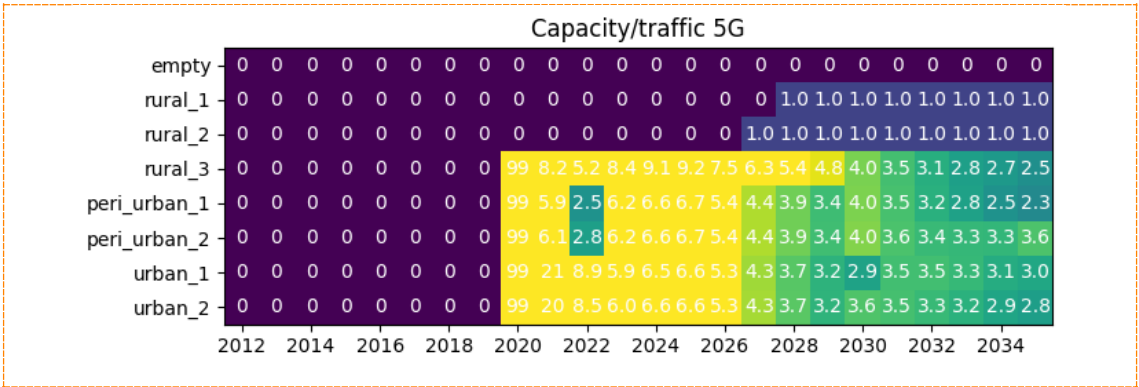


Figure 5 – Nombre de stations de base présentes au total sur tout le territoire national (courbe bleue) et par couple « technologie – bande de fréquence » (diagrammes barres), dans le scénario d’usages alternatif « Usages : croissance maîtrisée »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport



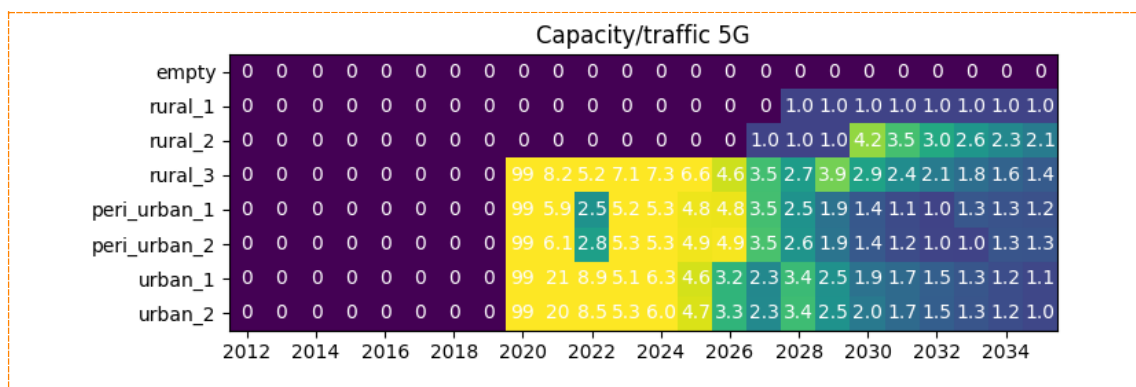


Figure 6 - Ratio « capacité/trafic » pour la technologie 5G par zone géographique, pour le scénario « Cahier des charges », scénarios d'usages « Usages : croissance maîtrisée » (en haut) et « Usages : référence » (en bas)
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

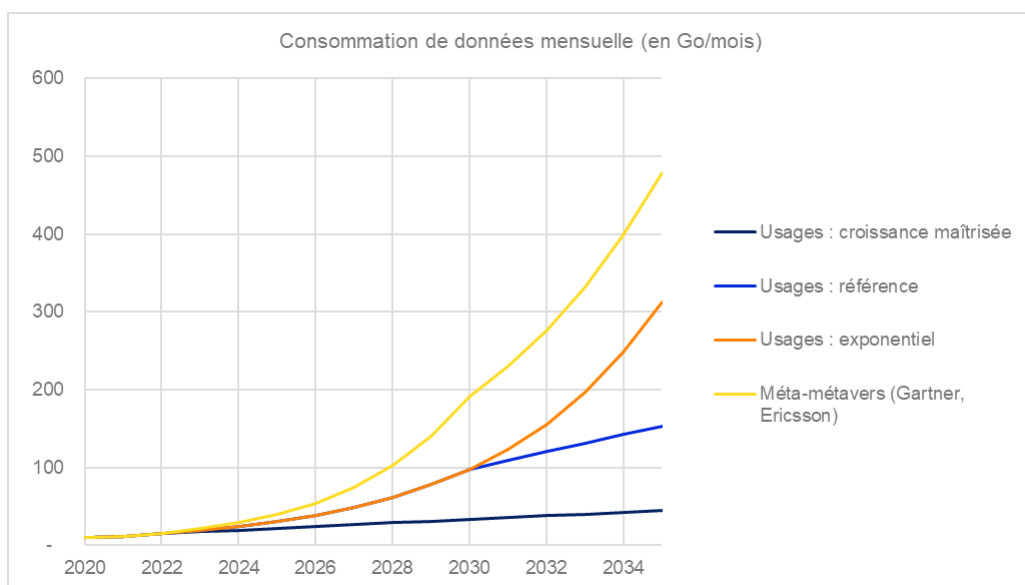


Figure 7 – Scénarios d'usages : évolutions de la consommation de données sur le territoire français métropolitain selon les scénarios
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

- Le scénario « Méta-métavers »** prévoit une croissance exponentielle de la consommation de données à + 37 %/an entre 2022 et 2030, atteignant **192 Go/mois/pers. en 2030**, continuant au rythme de + 20 %/an entre 2030 et 2035 ;

→ Ce scénario, qui mène à une consommation de données d'environ 480 Go/mois/pers. en 2035, représente une trajectoire prenant en compte un déploiement et une adoption généralisée des usages de mondes virtuels dans le monde et en France, selon les projections les plus ambitieuses du secteur aujourd'hui, couplée aux autres tendances toujours présentes : usages professionnels et grand public très intenses comme les usages immersifs, ainsi que des flux de communications IoT, IIoT et/dont M2M avec une généralisation de l'IA. La valeur moyenne donnée ici « par personne » intègre donc, de façon implicite, une part importante de trafic différent en nature du trafic généré par les usagers eux-mêmes.

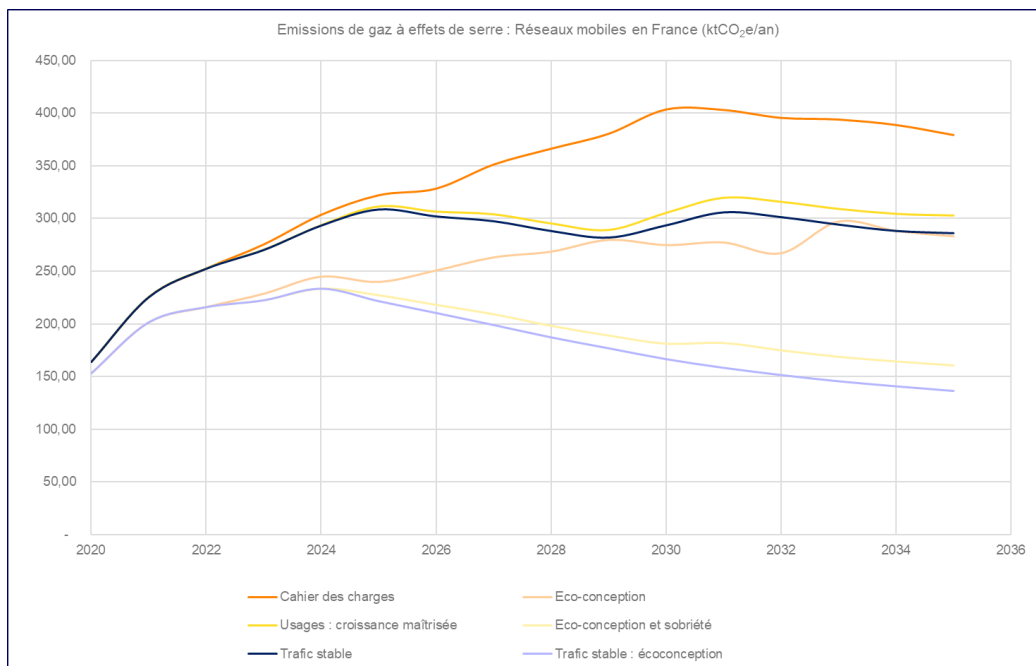


Figure 8 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges » et « Eco-conception », pour les scénarios d'usages « Usages : référence », « Usages : croissance maîtrisée » et « Trafic stable »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

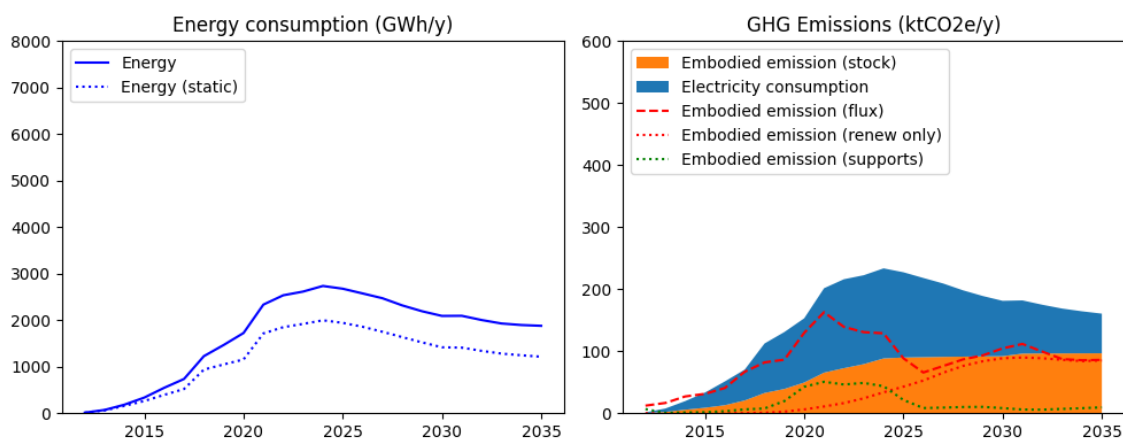


Figure 9 – Consommation d'électricité annuelle en phase d'opération (à gauche) et émissions carbonées annualisées associées aux phases de production et d'opération en approche « stock » et « flux » (à droite), dans le scénario « Eco-conçu et sobre »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Annexe 7 – Constellations en orbites basses : prévisions du secteur pour 2020-2050 : données, hypothèses et modèle

Constellation	Nombre de satellites simultanés en configuration « complète »	Début de déploiement	Fin de déploiement	Masse par satellite (kg)	Durée de vie d'un satellite (an)	Lanceur
SpaceX Starlink Gen2	7500	2023	2035	1000	5	Starship
SpaceX Starlink Gen1	4000	2022	2027	300	5	Falcon 9
China SatNet (Guo Wang)	12992	2024	2034	190	7	Longue Marche 5
Telesat Lightspeed	198	2026	2027	750	10	Falcon 9
OneWeb	6372	2022	2030	150	6	Falcon 9
Amazon Kuiper	3236	2024	2029	700	7	Atlas V New Glenn Ariane 64 Vulcan 6
IRIS2	170	2025	2027	725	7	Ariane 64
O3b mPower	13	2022	2026	1700	10	Falcon 9

Tableau 11 – Constellations en orbites basses : prévisions du secteur pour 2020-2050
Sources : A compléter, les données en italique sont des hypothèses

Méthodologie de sélection des constellations :

- A noter que la mutation et la croissance rapide du secteur spatial rendent même délicates les prévisions tendanciennes de l'évolution de l'activité du secteur. Par exemple, pour les satellites de télécommunications : 300 méga-constellations totalisant près d'un million de satellites ont déposé des demandes auprès de l'Union Internationale des Télécommunication (Falle A., 2023).

- Cependant, il est probable que seule une fraction soit réellement déployée si on considère que ce chiffre contient des demandes multiples effectuées au travers de différents pays pour un seul et même projet, et si on y applique ensuite un filtre de financement et de succès du développement technologique et industriel.
- Finalement, les constellations retenues sont celles dont l'implémentation effective est jugée suffisamment crédible, parce qu'elle est déjà en cours ou parce qu'elle est dirigée et financée par une très grande entreprise, un état ou groupe d'états.

Méthodologie :

- Afin d'estimer les implications potentielles de la réalisation de ces projets, le modèle développé par (Miroux L. et al., 2022) a été repris et adapté.
- A partir des informations sur les constellations rassemblées dans le tableau 11, le modèle permet de calculer en premier lieu la masse de charge utile à placer en orbite pour le déploiement de l'ensemble des satellites de chaque constellation mais aussi pour leur renouvellement (Figure 19)⁷.
- A partir de cette masse de charge utile à placer en orbite, il est possible de déduire la demande de nombre de lancements annuels pour chaque lanceur responsable de sa constellation.
- Ensuite, en se basant sur les caractéristiques réelles de chacun de ces lanceurs, le modèle évalue la quantité de composés critiques émis lors des phases de lancement (suie, alumine, vapeur d'eau), mais aussi la quantité de gaz à effets de serre émis lors des phases de production des structures et des ergols des lanceurs grâce à une base de données d'analyse de cycle de vie spécifique au système spatiaux (Wilson A. R., et al., 2018). Les émissions de gaz à effets de serre pour la production des composants et des carburants des satellites est également évaluée par le même moyen, mais en se basant sur un modèle de satellite type générique.
- Plus d'informations sur les hypothèses et méthodes employées dans le modèle peuvent être trouvées dans la publication (Miroux L. et al., 2022).
- Les valeurs en italique sont celles pour lesquelles aucune source n'est disponible.

⁷ En effet, afin d'optimiser la latence proposée par le service satellitaire, les opérateurs tendent à réduire l'altitude à laquelle leurs satellites sont placés, qui se retrouvent donc dans un environnement avec une densité atmosphérique plus élevée qui a pour effet de réduire leur durée de vie. Ainsi, chaque satellite doit être remplacé tous les 5 à 10 ans selon les cas étudiés.

Annexe 8 - Latence, couverture, capacité : coût environnemental de nos choix de services : données et hypothèses

L'ensemble des données et hypothèses est à retrouver ici : (The Shift Project, 2024a).

			Satellite GEO (Konnect VHTS)	Constellation LEO 1 (OneWeb)	Constellation LEO 2 (Starlink)
Données générales	Input	Nombre de satellites	1	648	5 100
		Durée de vie infrastructures (segments satellite, sol, utilisateur)	15	6	5
Segment satellite	Input	Masse d'un satellite (kg)	6 500	150	225
		Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg)	7 600	4 053	2 533
	Output	Empreinte carbone annualisée (kgCO ₂ e/an)	3 293 333	65 664 000	581 400 000
		Empreinte carbone annualisée (ktCO ₂ e/an)	3	66	581
	Données affichées	Masse totale mise en orbite (kg)	6 500	97 200	1 147 500
		Désorbitation et impact environnemental à la réentrée	Non	Oui	Oui
		Durée de vie des satellites (an)	15	6	5
Segment lanceur	Calcul intermédiaire	Masse de charge utile à orbiter (kg)	6 500	97 200	1 147 500
	Input	Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg)	4 923	11 667	1 630
	Output	Empreinte carbone annualisée (kgCO ₂ e/an)	2 133 333	189 000 000	374 000 000
		Empreinte carbone annualisée (ktCO ₂ e/an)	2	189	374
	Données affichées	Impact des particules en haute- atmosphère	Oui (alumine)	Oui (suies)	Oui (suies)
Segment sol (centres de contrôle)	Input	Nombre de stations (centres de contrôle mission)	10	40	100
		Nombre d'antennes par stations	1	25	8
		Nombre de centres de contrôle satellites	2	2	2

mission et satellites)		Facteur d'émission annualisé (kgCO ₂ e/kg/an)	143 000	82 077	75 308
	Output	Empreinte carbone fabrication annualisée (kgCO ₂ e/an)	1 716 000	86 180 769	61 451 077
		Empreinte carbone annualisée (kgCO ₂ e/an)	1 716 000	86 180 769	61 451 077
		Empreinte carbone annualisée (ktCO ₂ e/an)	2	86	61
Segment utilisateur	Input	Nombre de kit utilisateur	500 000	800 000	2 000 000
		Consommation électrique (kWh/an)	183	365	365
		Facteur émission électricité (kgCO ₂ e/kWh)	0,55	0,55	0,55
		Facteur d'émission kit (kgCO ₂ e)	264	527	527
	Output	Empreinte carbone fabrication annualisée (kgCO ₂ e/an)	8 783 333	70 266 667	210 800 000
		Empreinte utilisation (kgCO ₂ e/an)	50 187 500	160 600 000	401 500 000
		Empreinte carbone annualisée (kgCO₂e/an)	58 970 833	230 866 667	612 300 000
		Empreinte carbone annualisée (ktCO₂e/an)	59	231	612
Total	Output	Total (ktCO₂e/an)	66	572	1 629

Tableau 12 – Empreinte carbone de trois réseaux satellitaires type

Ont été utilisés : (ADEME, s. d.; Deloitte sustainability & Clean Space Industrial Days, ESA, 2021; Eutelsat, 2021; Ken Keiter, 2020; NegaOctet & ADEME, 2022; Osoro B et al., 2023; Starlink, s. d.).

Annexe 9 – Recommandations détaillées : actions à mener et acteurs à mobiliser

Mesure et transparence	
Objectif 1 : Assurer l'exhaustivité, la transparence et la robustesse des évaluations d'impacts environnementaux des équipements et services réseaux.	
Recommandation	A initier par :
Assurer la disponibilité des données nécessaires aux études d'impact, de manière publique et transparente. Permettre si nécessaire par voie réglementaire la transparence le long des chaînes de valeur impliquées dans les phases du cycle de vie des équipements et services.	• Pouvoirs publics ; • Acteurs économiques parties prenantes des chaînes de valeur
Encadrer les méthodologies d'évaluation d'impacts autour de principes permettant de les rendre transparentes et comparables, reconnues et auditables. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Construire des standards permettant de pousser les évaluations produites par les acteurs au niveau de rigueur nécessaire à construire des discussions et stratégies éclairées, sans brider la possibilité d'adaptation, d'évolution et de pluralité des méthodes et de la recherche sur le sujet.</i>	• Acteurs produisant des standards et conventions pour les méthodologies d'impact.

Prendre en compte de manière systématique et transparente les différentes phases du cycle de vie des équipements réseaux (production, transport, usage, fin de vie) dans les évaluations d'impacts et l'affichage environnemental (valorisation de l'éco-conception, suivi et orientations par des réglementations). <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Assurer la disponibilité des données de manière publique et transparente. Permettre si nécessaire par voie réglementaire la transparence le long de la chaîne de valeur.</i>	• Acteurs produisant des standards et conventions pour les méthodologies d'impact ; • Acteurs produisant des évaluations d'impact des équipements réseaux.
Elaborer une méthode suffisamment robuste pour l'évaluation des impacts des infrastructures lanceurs et satellites, notamment en haute atmosphère, et limiter le nombre de lancements et de réentrées dues aux infrastructures réseaux satellites, jusqu'à ce que l'impact environnemental soit connu et mitigé.	• Acteurs produisant des standards et conventions pour les méthodologies d'impact ; • Monde académique ; • Acteurs des télécommunications et systèmes spatiaux ; • Acteurs publics régulateur et opérant du spatial.
Inclure dans l'évaluation de l'empreinte environnementale de l'accès à internet pour les réseaux fixes l'accès à internet par satellite et par 4G/5G fixe. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Elaborer une méthode suffisamment robuste pour l'évaluation des impacts des infrastructures lanceurs et satellites.</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Acteurs des télécommunications et systèmes spatiaux ; • Opérateurs réseaux.

Objectif 2 : Disposer d 'un cadre de référence quantitatif pour le pilotage du secteur numérique sous la double contrainte carbone.	
Recommandation	A initier par :
Instaurer une trajectoire carbone de référence pour le secteur numérique en France (- 30 % de 2020 à 2030) et en Europe.	• Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Acteurs économiques du secteur numérique.
Intégrer une évaluation suffisamment consolidée de la consommation électrique du numérique dans les exercices de planification nationaux (RTE, DGEC, SGPE) pour l'intégrer dans l'exercice de bouclage, afin de préparer les arbitrages à venir sur la disponibilité en approvisionnement électrique (notamment au vu de la forte électrification des usages dans le cadre de la transition vers une société bas-carbone).	• Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Acteurs économiques du secteur numérique.
Intégrer la performance énergétique et la performance environnementale dans les critères d'évaluation des opérateurs par le régulateur.	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Acteurs économiques du secteur numérique.
Utiliser la consommation électrique globale évaluée par le régulateur comme critère de classement et de suivi d'efficacité pour les opérateurs, afin d'inciter les opérateurs à réduire leur consommation globale. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Intégrer ce critère dans une évaluation plus large de la performance énergétique et environnementale des opérateurs, prenant en compte les impacts carbone de la fabrication</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Acteurs économiques du secteur numérique.

des équipements (pour éviter un effet rebond sur le renouvellement des équipements) ainsi que les émissions engendrées par la consommation électrique (afin d'inciter les contributions à la décarbonation de la production d'électricité).	
---	--

Optimisation	
Objectif 1 : Eco-concevoir les équipements réseaux pour permettre de réduire leur consommation électrique.	
Recommandation	A initier par :
Maximiser et optimiser l'extinction de cellules en fonction du trafic (<i>sleep mode</i>) par bande de fréquences et technologie et développer la modulation de la puissance de transmission. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Réfléchir les baromètres et mesures de qualité de service en période de veille d'équipements afin de limiter l'incitation concurrentielle et valoriser l'optimisation de la consommation électrique.</i>	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux ; • Acteurs publics de la régulation et planification numérique.
Mettre en place une métrologie permettant un suivi et une limitation de la consommation des équipements réseaux en absolu sur un pas de temps donné, par exemple annuel. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Rendre possible le suivi en assurant la disponibilité de l'information, si nécessaire par voie réglementaire, auprès des fournisseurs d'énergie et équipementiers, ou bien par déploiement de points de mesure.</i>	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux.

Objectif 2 : Optimiser les stratégies de déploiements et les stratégies technologiques pour réduire la consommation électrique en phase d'opération.	
Recommandation	A initier par :
Etudier les effets bénéfiques potentiels, sur la rationalisation du réseau et de ses impacts, de la réduction des plages de fréquences utilisées pour les réseaux mobiles. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Les études d'impacts doivent être réalisées avec des hypothèses cohérentes d'évolution des volumes de trafic suivant les usages et technologies déployés, et comparées avec les études d'impact des stratégies de refarming aujourd'hui prévues.</i>	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux.
Orienter les recherches et innovations technologiques visant l'optimisation et la rationalisation des ressources réseaux (utilisation de l'IA, outils d'optimisation etc.) vers une baisse de la consommation énergétique absolue à débit ou capacité constants, plutôt que vers une augmentation des performances (débit, latence, fiabilité, capacité). <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Déployer en parallèle les leviers permettant d'endiguer l'inflation des usages très consommateurs en données afin de limiter les effets rebonds possible par effet d'usage.</i>	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux.

Piloter le déploiement des infrastructures satellites au regard des besoins et des études d'impact énergie-carbone à construire au préalable, afin d'étudier les optimisations et complémentarités possibles avec les réseaux terrestres, en évitant redondance et empilement.	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Opérateurs réseaux.
Objectif 3 : Réduire les impacts carbone de production, de déploiement et d'opération des équipements réseaux.	
Recommandation	A initier par :
Intégrer des critères carbones dans les cahiers des charges de construction des sites, afin de favoriser le recours à des méthodes et matériaux bas carbone.	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Opérateurs réseaux.
Mettre en place les cadres comptables, techniques et stratégiques permettant d'allonger la durée de vie et de favoriser la réutilisation (entre acteurs et pays) des équipements réseaux.	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux.
Structurer les filières de collecte, tri, réparation et traitement des équipements réseaux et box internet préalablement éco-conçus, afin d'en réduire les impacts de la phase de fin de première vie. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Mettre en place les cadres permettant d'allonger la durée de vie des équipements, pour éviter des effets rebonds sur le renouvellement des équipements.</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux.

Objectif 4 : Promouvoir des évolutions technologiques facilitant l'optimisation des réseaux.	
Recommandation	A initier par :
Implémenter une fonctionnalité d'orientation automatique des terminaux vers la connexion Wifi lorsque détectée. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Adapter cette fonctionnalité à l'état des enjeux et normes de sécurité (uniquement sur réseau privé, ou bien ajout de règles imposées sur les normes de sécurité des réseaux publics par exemple).</i>	• Fournisseurs de services numériques (éditeurs, contenus et applications) ; • Fournisseur de logiciels et systèmes d'exploitation des terminaux.
Produire des directives claires sur l'adoption des codecs vidéo les plus efficaces réduisant la consommation de bande passante du réseau, tout en favorisant la comptabilité matérielle des terminaux. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Déployer en parallèle les leviers permettant d'endiguer l'inflation des usages très consommateurs en données afin de limiter les effets rebonds possible par effet d'usage.</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Fournisseurs de services numériques ; • Constructeurs de terminaux.

Réorganisation collective vers la sobriété	
Objectif 1 : Endiguer l'inflation des usages très consommateurs en données afin de limiter l'effet d'usage (déploiement des infrastructures pour absorber une hausse d'usages).	
Recommandation	A initier par :
Conditionner l'augmentation du trafic ou des performances des infrastructures réseaux au respect de la trajectoire de réduction des impacts carbone-énergie du réseau. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Instaurer une trajectoire de référence pour le secteur numérique ; en France : - 30 % de GES à 2030.</i> <i>Prendre en compte les différentes phases du cycle de vie des équipements dans les évaluations d'impacts.</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Opérateurs réseaux.
Adopter une stratégie de déploiement ciblé de la 5G sur des usages et sites prioritaires, et indexé sur une trajectoire du numérique compatible 2°C, plutôt qu'un déploiement voulu généralisé. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Instaurer une trajectoire de référence pour le secteur numérique ; en France : - 30 % de GES à 2030.</i> <i>Conditionner l'augmentation du trafic ou des performances à une compatibilité avec la trajectoire de réduction des impacts carbone-énergie du réseau.</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Opérateurs réseaux.

Faire de la réduction de l'impact environnemental absolu des réseaux un critère angulaire du cahier des charges de la 6G, afin d'assurer une conception de la génération 6G au service de la décarbonation et de la résilience. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Prendre en compte les différentes phases du cycle de vie des équipements dans les évaluations d'impacts.</i> <i>Evaluer les impacts absolus (au total sur l'infrastructure) et non unitaires (à l'échelle d'un équipement et par unité de volume) dans les évaluations d'impacts, sur la base d'hypothèses cohérentes d'évolution des volumes de trafic suivant les usages et technologies déployés.</i>	• Acteurs de la spécification technologique au niveau européen ; • Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Opérateurs réseaux ; • Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie.
Encadrer les débits maximums des usages pouvant devenir dimensionnant, comme les caméras de télésurveillance. <i>Conditions de pertinence du levier :</i>	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique.
Introduire un référentiel d'éco-conception des services numériques au sein du marché : • Activation par défaut d'un mode économie de données pour la fourniture de contenu et pour les terminaux ; • Intégration d'une fonction « audio-only » sur les plateformes vidéo ; • Résolution par défaut ajustée au type de terminal : 1080p pour PC et TV (720p en mode économie de donnée), 720p pour tablette et smartphone (480p en mode économie de données) ; • Rendre inaccessibles les plus hautes résolutions (4K et 8K) en réseau mobile sur les tablettes et smartphones, pour les limiter aux usages techniquement pertinent ;	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie ; • Fournisseurs de services numériques ; • Opérateurs réseaux.

• Interdiction de l'auto-play sans interaction minimale avec l'utilisateur (par exemple via une option « afficher plus ») ; <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Recours à des outils contraignants si nécessaire, qui permettent de produire un cadre commun pour les acteurs économiques, notamment ceux dont les modèles économiques s'appuient sur des logiques perturbées par ces leviers (notamment ceux relevant de l'économie de l'attention).</i> <i>Création d'indicateurs environnementaux permettant l'évaluation des gains associés à la mise en pratique des critères (étude d'impact) ainsi que leur pilotage leur priorisation.</i>	
Dimensionner les équipements sur une portion de trafic plus large que l'heure chargée, davantage en moyenne qu'en « pic », en réfléchissant et pilotant l'augmentation des délais pour certains usages en cas de congestion (à l'heure chargée par exemple).	• Fournisseurs d'équipements réseaux ; • Opérateurs réseaux ; • Acteurs publics de la régulation et planification numérique.

Objectif 2 : Rendre possible le changement de paradigme nécessaire aux nouveaux arbitrages sur les infrastructures pour les rendre sobres.	
Recommandation	A initier par :
Généraliser à d'autres services numériques que la vidéo l'adaptation automatique du débit au type de terminal utilisé. <i>Conditions de pertinence du levier :</i> <i>Recours à des outils contraignants si nécessaire, qui permettent de produire un cadre commun pour les acteurs économiques, notamment ceux dont les modèles économiques s'appuient sur des logiques perturbées par ces leviers (notamment ceux relevant de l'économie de l'attention).</i> <i>Création d'indicateurs environnementaux permettant l'évaluation des gains associés à la mise en pratique des critères (étude d'impact) ainsi que leur pilotage leur priorisation.</i>	Fournisseurs de services numériques.
Assurer la compatibilité des cahiers des charges (existants, à venir) des réseaux mobiles avec les objectifs énergie-climat en effectuant les arbitrages en couverture et déploiements capacitaires (fixes, mobiles, satellites) et les objectifs de desserte. Intégrer par exemple des conditions fortes sur les trajectoires de la consommation et des émissions de GES dans l'attribution des autorisations d'exploitation des fréquences.	- Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; - Opérateurs réseaux.
Elaborer une charte de sobriété des transferts de données numériques via la collaboration entre émetteur et transporteur de trafic.	- Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; - Fournisseurs de services numériques ; - Opérateurs réseaux.

Formation et compétences	
Objectif : Permettre à toutes les parties prenantes d'atteindre le niveau de compréhension des enjeux et d'expertise technique nécessaires à la mise en place des nouveaux paradigmes.	
Recommandation	A initier par :
Déployer des formations continues systématiques et obligatoires aux enjeux énergie-climat et aux impacts du numérique au sein des organisations et parties prenantes du numérique.	• Acteurs publics de la régulation et planification numérique ; • Acteurs publics de la planification carbone-énergie. • Acteurs économiques du secteur.
Intégrer dans les formations initiales des métiers réseaux les connaissances nécessaires à la conception et au déploiement de réseaux éco-conçus et sobres : solutions d'éco-conception des équipements et services, conditions de pertinence des technologies d'optimisation (gestion des effets rebonds etc.), remontées et suivi des consommations des équipements, impacts de production/déploiement/maintenance etc.	• Acteurs de la formation initiale (universités, écoles d'ingénieurs, écoles des métiers du numérique etc.)

Références

ADEME. (s. d.). *Base Empreinte*. Consulté 7 mars 2024, à l'adresse <https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees>

Ahmed A. & Coupechoux M. (2023). *The Long Road to Sobriety: Estimating the Operational Power Consumption of Cellular Base Stations in France*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10292167>

Arcep. (2022). *Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G* [Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles]. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique/consommation-energetique-reseaux-mobiles-etude-comparee.html>

Arcep. (2023a). *Attribution des fréquences en métropole—Grand dossier 5G*. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g/attribution-des-frequences-en-metropole.html>

Arcep. (2023b). *Evaluation de l'impact Carbone de l'arrêt des réseaux 2G-3G et la migration de leurs services vers la 4G/5G*. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>

Arcep. (2023c). *Les services de communications électroniques en France—2ème trimestre 2023*. <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/observatoire-des-marches-des-communications-electroniques-en-france/t2-2023.html>

Auer et al. (2011). *How much energy is needed to run a wireless network?* <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6056691>

Birari, N. (2022). *Power Consumption Analysis of 5G Transmit Antenna Topologies and Beamforming Schemes*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:7272c611-94b1-4a02-ad74-dcd246a68eae>

Bou Rouphael, R. et al. (2023). *The Impact of Networks in the Greenhouse Gas Emissions of a Major European CSP*. https://hal.science/hal-04174678v1/file/final_The_impact_of_networks_in_the_greenhouse_gas_emissions_of_a_Major_European_CSP.pdf

Citizing. (2020). *Déploiement de la 5G en France : Quel impact sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone ? - Contribution au rapport du Haut conseil pour le climat*.

Coupechoux, M. (2020). *Les débits en 5G : mythes et réalité—Grand dossier 5G*. https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1677573101/user_upload/grands_dossiers/5G/debits-5G-mythes-realites.pdf

Deloitte sustainability, & Clean Space Industrial Days, ESA. (2021). *Ground station life cycle assessment*. https://indico.esa.int/event/321/contributions/6357/attachments/4332/6535/20210920%20ESA_CSID%202021_GSt%20LCA_vf.pdf

- Despois, T. (2020). *5G 28 GHz high efficiency integrated phased array transceivers*. <https://www.theses.fr/2020BORD0151>
- Eutelsat. (2021). *Télévision par satellite : Et si on parlait empreinte carbone ?* https://www.eutelsat.com/files/PDF/fr/groupe/Etude_empreinte_carbone_2021.pdf
- HCC. (2020). *Maîtriser l'impact carbone de la 5G* [Haut conseil pour le climat]. <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-limpact-carbone-de-la-5g/>
- INSEE. (2023). *Bilan démographique 2022*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6687000>
- Ken Keiter (Réalisateur). (2020, novembre 25). *Starlink Teardown: DISHY DESTROYED!* consulté sur <https://www.youtube.com>. <https://www.youtube.com/watch?v=iOmdQnlnRo>
- Kim et al. (2023). *Korea's leadership in 5G and beyond: Footprints and futures*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308596123001246>
- Lightreading. (2024). *Kakao wins 28GHz auction to become South Korea's fourth operator*. <https://www.lightreading.com/regulatory-politics/kakao-wins-28ghz-auction-to-become-south-korea-s-fourth-operator>
- NegaOctet, & ADEME. (2022). *Le jeu de données relatif au projet NegaOctet 1.4 documenté dans la base Impact au sein de la base Empreinte de l'ADEME*. <https://base-empreinte.ademe.fr/>
- Osoro B, Oughton E., Wilson A. R., & Rao A. (2023). *Sustainability assessment of Low Earth Orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations*. https://www.researchgate.net/publication/373715821_Sustainability_assessment_of_Low_Earth_Orbit_LEO_satellite_broadband_mega-constellations
- Qualcomm Japan. (2023). [Titre traduit] *Propositions pour favoriser l'usage des ondes 5G/millimétriques. Transférer le succès de la 5G/onde millimétrique à la 6G*. https://www.soumu.go.jp/main_content/000860192.pdf
- Starlink. (s. d.). *Starlink : Specifications*. Consulté 7 mars 2024, à l'adresse <https://www.starlink.com/specifications>
- Stobbe, L. et al. (2023). *Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland*.
- The Shift Project. (2024a). [Energie, Climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients—Materials] *Empreinte carbone réseaux satellitaires*.
- The Shift Project. (2024b). [Energie, Climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients—Materials] *Modèle Réseaux*.
- WIA. (2023). *Wireless Infrastructure By The Numbers 2022 Key Industry Statistics*. <https://wia.org/wireless-infrastructure-by-the-numbers-2022-key-statistics/>
- ZDNet. (2022). *Home Tech Smartphones 5G South Korea cancels 5G 28GHz spectrum allocation to telcos due to « lack of spending »*. <https://www.zdnet.com/article/south-korea-cancels-5g-28ghz-spectrum-allocation-to-telcos-due-to-lack-of-spending/>

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Le développement exponentiel du numérique, et la façon dont ce développement peut interagir avec les objectifs de décarbonation de nos sociétés, constitue l'un des angles essentiels des enjeux de la transition carbone.

Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

Contacts:

Ilana Toledano

Responsable Communication

+33 (0) 6 01 19 64 04

ilana.toledano@theshiftproject.org

Hugues Ferreboeuf

Chef de projet « Numérique »

Maxime Efoui-Hess

Coordinateur du programme « Numérique »

maxime.efoui@theshiftproject.org

Marlène De Bank

Ingénieure de recherche

marlene.debank@theshiftproject.org



16 rue de Budapest, 75009 Paris

contact@theshiftproject.org

www.theshiftproject.org