



LE THINK TANK
DE LA TRANSITION
BAS-CARBONE

ÉNERGIE, CLIMAT : DES RÉSEAUX SOBRES POUR DES USAGES CONNECTÉS RÉSILIENTS

**DES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES ADAPTÉES
À LA DOUBLE CONTRAINTE CARBONE**

RAPPORT INTERMÉDIAIRE — DÉCEMBRE 2023



Crédit photo : Image de rawpixel.com sur Freepik

Avant-propos

Au sein de son programme de travail consacré aux **enjeux des technologies numériques vis-à-vis de la double contrainte carbone (réduction des émissions carbonées, affranchissement à notre dépendance aux énergies fossiles)** The Shift Project a publié, au cours des dernières années, quatre études portant sur l'impact environnemental du numérique :

- **Lean ICT – Pour une sobriété numérique (2018)**
Rapport évaluant des impacts environnementaux (notamment carbone et énergie) du numérique à l'échelle mondiale, actuels et à horizon 2025.
- **L'insoutenable usage de la vidéo en ligne (2019)**
Rapport traçant les liens entre construction sociologique des usages numériques et les dynamiques de nos infrastructures, sur la base de l'exemple de la vidéo en ligne.
- **Déployer la sobriété numérique (2020)**
Cadres méthodologiques que les acteurs publics et privés doivent s'approprier afin d'entamer les transformations opérationnelles qui mèneront à un numérique compatible avec les objectifs de décarbonation.
- **Impact environnemental du numérique - tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G (2021)**
Rapport mettant à jour les trajectoires d'évolution à 2025 de l'impact énergie-carbone du numérique produite par le Shift en 2018. Il revient également sur la manière dont le débat sur la 5G s'est cristallisé, et sur les éléments qui en font un cas d'étude des dynamiques décrites dans les rapports précédents du Shift : l'évolution des usages et son interaction avec le développement des infrastructures.

De nombreuses initiatives sont nées parmi les acteurs du numérique, qui sont rapidement et fortement montés en compétence sur le sujet de l'impact carbone et énergie des biens et services connectés. L'ambition des travaux menés dans notre programme de travail est ainsi de **construire une vision globale de ce qu'implique un numérique sobre et résilient, a minima au niveau européen, et d'éclairer la question centrale de ce défi : « Comment faire du numérique un véritable outil pour repenser les modes de production et de consommation plutôt qu'un simple levier d'optimisation des modes actuels ? ».**

La phase en cours de ces travaux comporte deux axes, menés en parallèle :

- Notre travail sur les conditions de pertinence des mondes virtuels au vu des contraintes énergie-climat, dont l'ambition est de documenter la manière dont les promesses et projections de nouveaux usages peuvent enclencher le déploiement de certaines trajectoires dans les choix de développement d'infrastructures numériques ;
- Notre travail sur les infrastructures réseaux et les stratégies à mettre en œuvre pour les rendre résilientes à la double contrainte carbone, dont le présent document est le rapport intermédiaire.

Ce travail encore imparfait et incomplet est présenté et discuté lors d'un événement dédié du Shift Project le 14 décembre 2023, selon notre méthode itérative usuelle.

À propos du think tank The Shift Project

Le Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe.

Le Shift Project constitue des groupes de travail autour des enjeux les plus décisifs de la transition, produit des analyses robustes et chiffrées sur ces enjeux et élabore des propositions rigoureuses et innovantes. Il mène des campagnes d'influence pour promouvoir les recommandations de ses groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques. Il organise également des événements qui favorisent les discussions entre parties prenantes et bâtit des partenariats avec des organisations professionnelles et académiques, en France et à l'étranger.

Le Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et, depuis 2020, par des PME et des particuliers. Il est épaulé par un réseau de plusieurs dizaines milliers de bénévoles présents sur tout le territoire : The Shifters.

Depuis sa création, le Shift Project a initié plus de 50 projets d'étude, participé à l'émergence de deux manifestations internationales (Business and Climate Summit, World Efficiency) et organisé plusieurs centaines de colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs débats publics et décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

L'ambition du Shift Project est de mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques, mais aussi et surtout sur les opportunités engendrées par la « double contrainte carbone » que représentent ensemble les tensions sur l'approvisionnement énergétique et le changement climatique. Sa démarche est marquée par un prisme d'analyse particulier, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité ; il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

Il est épaulé par un réseau de dizaines de milliers de bénévoles regroupés au sein d'une association loi 1901 : The Shifters, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant aider le Shift par un travail de recherche, de relais ou de soutien, les Shifters réalisent de plus en plus de travaux indépendants, mais toujours avec un objectif : contribuer efficacement à la sortie des énergies fossiles à l'échelle française et européenne.

Votre participation aux travaux : relectures et contributions

Le travail qui vous est présenté ici est exploratoire : il vise à initier de nouvelles discussions et pose sur de nombreux sujets davantage de questions qu'il n'en résout. Bien qu'il soit déjà le fruit d'un travail collectif, ce rapport intermédiaire est encore un document de travail imparfait, incomplet et évolutif.

Comme vous le constaterez, les résultats de nos analyses quantitatives n'ont pas encore été pleinement réalisés. Pour les phases de travail à venir, toute source de données que vous trouveriez essentielles à intégrer à nos travaux seront les bienvenues.

Vos retours seront également précieux sur l'ensemble du document et des éléments qui vous y sont présentés : méthodologie, approche générale et choix des angles choisis sont ici présentés pour être soumis aux avis des parties prenantes du sujet des technologies numériques, de leur décarbonation et de leurs enjeux de résilience.

Dans cette logique, nous vous prions d'envoyer vos remarques, critiques et propositions aux contacts indiqués en fin de rapport.

Vous n'avez bien entendu pas besoin de lire l'ensemble de ce long document pour nous aider à l'améliorer : toutes les contributions sont les bienvenues.

Nous avons besoin de vous !

Comité de rédaction

Le groupe de travail

Marceau COUPECHOUX (Professeur, Telecom Paris et École Polytechnique)

Marlène DE BANK (Ingénieure de recherche « Numérique », The Shift Project)

Maxime EFOUI-HESS (Coordinateur du programme « Numérique », The Shift Project)

Hugues FERREBOEUF (Chef de projet « Numérique », The Shift Project)

Gaël GUENNEBAUD (Chargé de Recherche, Inria - Université de Bordeaux)

Florian MILLET (Ingénieur radio, Davidson consulting)

François RICHARD (Membre du Groupe expert, The Shift Project)

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

Partenaires

Le programme « Numérique » de The Shift Project est accompagné par ses partenaires, qui rendent possible par leur soutien et leur participation les travaux dont le présent rapport est l'un résultat :



Table des matières

AVANT-PROPOS.....	2
À propos du think tank The Shift Project	3
Votre participation aux travaux : relectures et contributions	4
Comité de rédaction	5
Partenaires	6
Table des matières	7
INTRODUCTION	8
RESEAUX MOBILES : DIMENSIONNEMENTS POSSIBLES ET TRAJECTOIRES D’EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	14
Projections et scénarios de spécifications et déploiement des réseaux	15
L’approche en « backcasting » : outil de construction d’un numérique sobre....	20
Description de l’outil de modélisation : périmètre, méthodologie, structure et applications possibles	22
ADAPTER LES INFRASTRUCTURES RESEAUX A LA DOUBLE CONTRAINTE CARBONE.....	36
Infrastructures réseaux : quels risques, quelle résilience ?.....	37
Planifier la complémentarité des réseaux	38
Quels leviers pour mener nos réseaux à un futur sobre et résilient ?	39
CONCLUSION.....	42
ANNEXE – DONNEES COMPLEMENTAIRES	44
REFERENCES	46

01

INTRODUCTION

Introduction

Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie

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

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

Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial par poste en 2019

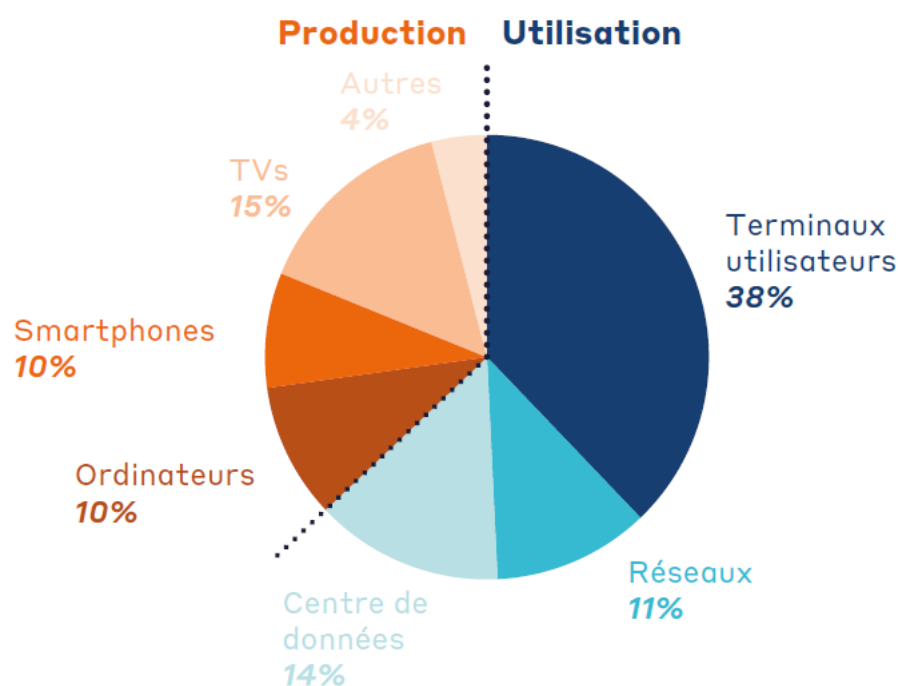


Figure 1 – Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial en 2019, par poste pour les phases de production (40 %) et d'utilisation (60 %)

Source : (The Shift Project, 2021)

Chaque service numérique s'appuie sur des infrastructures physiques dont la résilience et la pertinence vis-à-vis de la **double contrainte carbone (réduction des émissions carbonées de nos activités, affranchissement à notre dépendance aux énergies fossiles)** doivent être pensées. Le numérique est un catalyseur : là où il est déployé, il permet d'optimiser, accélérer, fluidifier, paralléliser... Le déployer sans stratégie mène donc à l'accélération de toutes les dynamiques, y compris des plus éloignées de nos objectifs de résilience. En faire un véritable outil de réinvention de nos activités pour les rendre compatibles avec le XXI^{ème} siècle réclame une stratégie et une compréhension systémique des impacts du numérique.

Une trajectoire insoutenable à infléchir

Le numérique est aujourd'hui déjà un secteur non-négligeable du point de vue carbone, représentant près de 4 % des émissions mondiales (The Shift Project, 2021), soit du même ordre que l'intégralité des poids lourds dans le monde (IEA, 2021). A l'échelle française, le numérique représente 2,5 % de l'empreinte carbone du pays (The Shift Project, 2023a).

Sa particularité tient dans les tendances que suivent ses émissions, qui croissent selon une dynamique particulièrement rapide et incompatible avec sa décarbonation : + 6 %/an en moyenne au niveau mondial (The Shift Project, 2021) et + 2 à 4 %/an en France (ADEME & Arcep, 2023; HCC, 2020; Sénat, 2020). Les optimisations incrémentales ne parviennent pas à compenser le développement soutenu de ses infrastructures, parcs et flux (ADEME & Arcep, 2023; Bol et al., 2020; European Commission, 2020; GreenIT.fr, 2019; IEA, 2022; The Shift Project, 2023a). Ce

constat continue de se vérifier et s'est illustré au cours des cinq dernières années, qui devaient pourtant marquer un plafonnement de ces impacts grâce au progrès technologique (IEA, 2019; ITU-T, 2020; Masanet et al., 2020).

A l'échelle de la France comme à l'échelle mondiale, le numérique représente plus de 10 % de la consommation électrique (The Shift Project, 2021, 2023a). Dans un contexte d'électrification intense des usages (mobilité, bâtiment, industrie etc.), on comprend qu'il est lui aussi au cœur des enjeux de planification de la transformation de nos systèmes et de priorisation d'accès aux ressources désormais en tension, dont l'électricité fait partie (The Shift Project, 2023a).

Rendre le numérique compatible avec la double contrainte carbone ne consiste donc pas à accélérer ses leviers d'optimisation déjà déployés, mais à le placer sur une trajectoire fondamentalement différente de celle qu'il suit actuellement. Au même titre que les autres secteurs de l'économie, il doit ainsi atteindre son objectif de décarbonation, que les acteurs industriels (GSMA, GeSI¹) se sont eux-mêmes fixés par le biais de l'initiative SBTi et sur la base d'une recommandation de l'ITU (SBTi et al., 2020, p. 9) à **- 45 % à 2030 par rapport à 2020 au niveau mondial**. The Shift Project propose de prendre cet objectif comme base de la construction de trajectoire nationale, en l'adaptant aux spécificités de la décarbonation déjà importante du mix électrique du pays. **The Shift Project préconise de construire la trajectoire française autour de cet objectif SBTi recalculé pour l'adapter au cas français, de - 30 % des émissions du secteur à 2030 par rapport à 2020.**

Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des réseaux

Les réseaux sont une brique à la fois élémentaire et loin d'être négligeable de notre système numérique.

Du point de vue quantitatif, ils représentent **entre 12 %** (The Shift Project, 2021) **et 25 à 35 % de l'empreinte carbone du numérique dans le monde** (Freitag C. et al., 2021; Malmodin J. et al., 2023) **et 5,5 % en France** selon les estimations actuelles de l'ADEME et l'Arcep (ADEME & Arcep, 2023). En France, la consommation électrique des 4 principaux opérateurs affiche un taux de croissance moyen de + 6 %/an entre 2017 et 2021 pour atteindre presque 4 TWh en 2021², dont 60 % pour le seul réseau d'accès mobile (ADEME & Arcep, 2023). Cette croissance est principalement expliquée par la croissance de ce dernier avec le déploiement massif et régulier de nouveaux sites et équipements. Ces dynamiques n'ont rien d'une particularité hexagonale, en ce qu'elles se retrouvent au niveau européen (Lunden D. et al., 2022), ainsi qu'au niveau mondial où la consommation électrique des réseaux mobiles accuse une croissance linéaire de 12 %/an et représente 1,5 fois celle des réseaux fixes (The Shift Project, 2021).

¹ GSMA : GSM Association, association rassemblant les acteurs internationaux de la connectivité mobile (constructeurs, opérateurs etc.). | GeSI : Global enabling Sustainability Initiative, groupement d'acteurs internationaux du numérique et des télécommunications, dont la mission est d'œuvrer sur le numérique durable.

² Ce chiffre n'intègre pas la consommation des box internet et autres équipements réseaux installés par les opérateurs chez les clients (par exemple, ONU). Ce chiffre exclut également les réseaux d'entreprise et les réseaux n'étant pas possédés par les 4 opérateurs principaux (par exemple, le réseau RENATER).

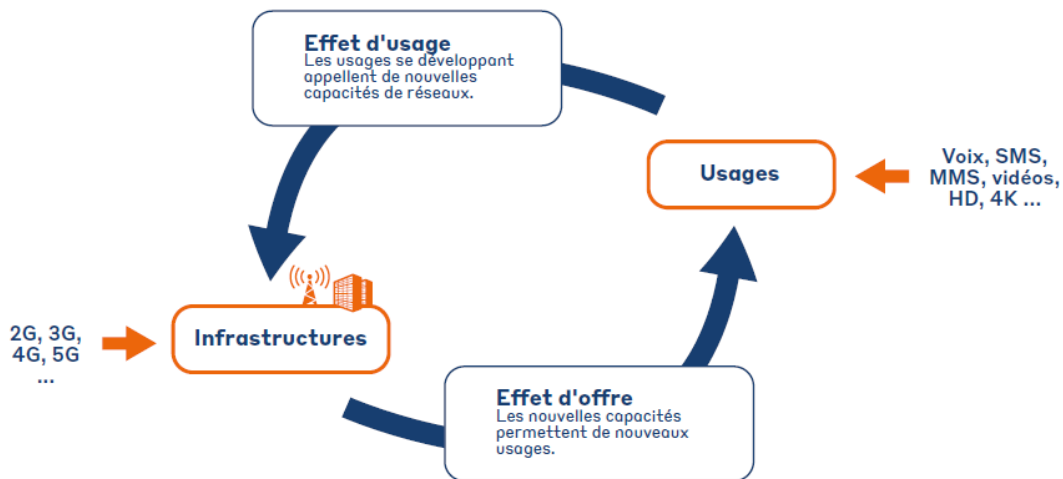


Figure 2 – Nos usages et nos réseaux sont les deux faces d'une même dynamique
 Source : (The Shift Project, 2021)

Ces dynamiques propres aux réseaux s'intègrent dans **une logique systémique** : le numérique fonctionne en système et ses trois tiers (terminaux, infrastructures réseaux, centres de données) évoluent de concert. Les choix de déploiements faits au niveau des réseaux impactent l'ensemble du système numérique tout en étant le résultat de la trajectoire générale donnée au système :

- La volonté de déployer de nouveaux usages justifie le déploiement de nouvelles capacités (la multiplication des contenus vidéos appelle un besoin de plus grande capacités réseaux en mobilité etc.) : c'est **l'effet d'usage** ;
- Le déploiement de nouvelles capacités entraîne le développement de nouveaux usages (possibilité de visionner des vidéos UHD en itinérance, nécessité de renouveler son smartphone pour profiter pleinement de ce nouveau service etc.) : c'est **l'effet d'offre** ;

Cette volonté entérinée, lorsqu'elle se traduit en politiques publiques et stratégies économiques, les directions qui les motivent : une fois les déploiements d'équipements réseaux réalisés, il est indispensable de les rentabiliser selon les modalités rendues possibles par les projections qui les ont initialement motivés. Au cours des dernières décennies et jusqu'à aujourd'hui, **la trajectoire choisie a été celle de l'augmentation simultanée des trois composantes des capacités réseaux** :

- **Augmentation des débits et fréquences**, engendrant notamment une réduction de portée et donc un accroissement du nombre de sites ;
- **Réduction de la latence**,
- **Augmentation de la couverture des populations et territoires**, engendrant mécaniquement ici aussi un accroissement du nombre de sites.

Cette étude vise donc, dans l'approche systémique construite par The Shift Project depuis 2018, à documenter plus précisément les enjeux du tiers « Infrastructures réseaux » au sein des dynamiques de transformation à opérer sur le système numérique français et européen pour le rendre sobre et résilient. **Le périmètre de l'étude sera concentré autour de deux grandes composantes** :

- **Les réseaux mobiles**, qui sont aujourd’hui la partie de l’infrastructure tirant la consommation électrique des réseaux et sa croissance. Les réseaux fixes seront évidemment intégrés dans les réflexions systémiques finales ;
- **Les infrastructures satellitaires**, qui proposent une infrastructure supplémentaire et nouvelle, à la fois du point de vue des réseaux (avec des modalités de couverture, de déploiement et d’opération tout à fait différentes des solutions terrestres) et du point de vue de l’écosystème aérospatial (les dynamiques appelées par ces infrastructures numériques engendrant des ruptures fortes sur les ordres de grandeur de nombres de satellites mis en orbite et de lancements réalisés).

Le périmètre géographique de l’étude s’appuiera sur des quantifications réalisées à l’échelle française, afin de **construire les outils et lignes de force des réflexions grâce auxquels pourra être construit le cahier des charges d’un numérique sobre et résilient au niveau européen.**

Planifier et déployer les infrastructures qui assureront résilience aux écosystèmes et services numériques européens des décennies à venir nécessite de comprendre comment s’agencent les dynamiques des différentes briques systémiques. Les réseaux sont l’une d’elles et leur évolution est ici étudiée en parallèle de la documentation de l’une des franges de nouveaux usages appelant des modifications capacitaires structurelles : les mondes virtuels, étudiés au sein de notre rapport « Quels mondes virtuels pour quel monde réel ? » (The Shift Project, 2023b).

02

RÉSEAUX MOBILES : DIMENSIONNEMENTS POSSIBLES ET TRAJECTOIRES D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Réseaux mobiles : dimensionnements possibles et trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre

Projections et scénarios de spécifications et déploiement des réseaux

Approche par scénarios : des choix-clés qui déterminent le dimensionnement des réseaux futurs

Motivés à la fois par les décisions politiques et les stratégies économiques des parties prenantes, les choix portant sur les solutions technologiques et les modalités de déploiement des réseaux des prochaines décennies déterminent les trajectoires de consommation énergétique et d'émissions carbone possibles pour ces infrastructures.

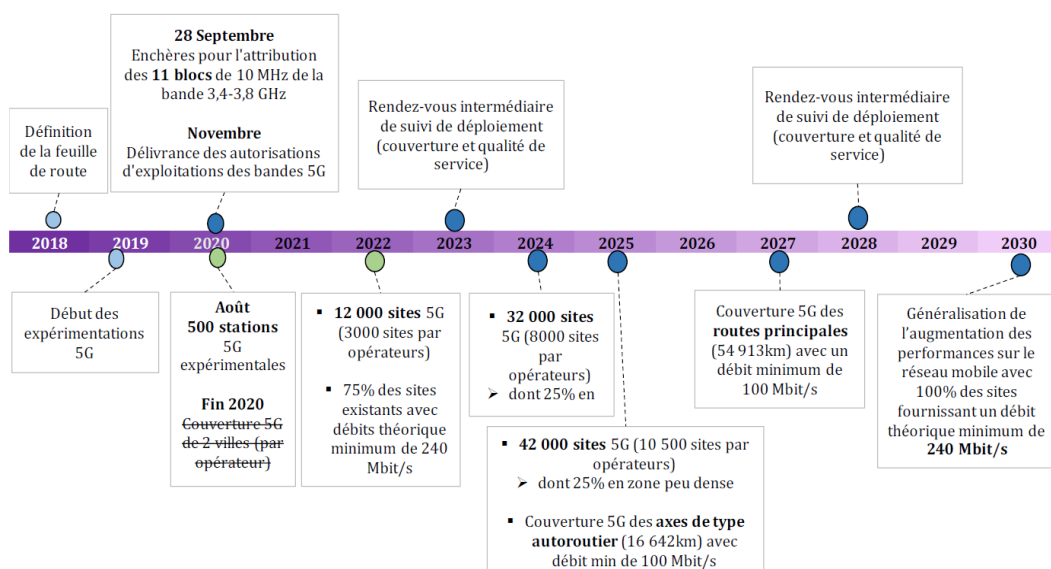


Figure 3 – Frise des principales obligations du cahier des charges de l'Arcep aux opérateurs pour la 5G
 Source : image tirée de (Citizing, 2020), sur la base de (Arcep, 2019)

Une partie de ces choix sont entérinés du point de vue réglementaire au sein des cahiers des charges formulés par l'Arcep, par exemple dans le cadre du processus d'attribution des gammes de fréquences pour le déploiement de la 5G (Arcep, 2019), dont les calendriers et priorités de déploiement de cette génération mobile (Figure 3). C'est sur cette base que les scénarios ici présentés sont construits afin de caractériser les effets, sur le dimensionnement des infrastructures réseau, des décisions passées (4G, 5G...), futures (6G...) et de leurs alternatives possibles.

Scénario réseaux mobiles						
	Maximaliste	Cahier des charges actuel	Zéro zone blanche	Urbain	Mutualisé	Un sobre
Stratégies de déploiement et enjeux sociétaux ("as usual" : cahier des charges Arcep 5G)						
Calendrier de déploiement, adéquation technologique	as usual	as usual	as usual	as usual	as usual	revus et pilotés
Couverture - Nombre sites, population, superficie	totale	as usual	totale	urbain et suburbain	as usual	as usual
Couverture - Routes, autoroutes, axes ferro.	as usual	as usual	suspendu	as usual	as usual	suspendu
Services industriels différenciés	as usual	as usual	as usual	as usual	as usual	suspendu
Agriculture connectée aux réseaux mobiles	oui	non	non	non	non	non
Offre, dont capacités de mutualisation ("as usual" : tendances actuelles)						
Passive (partage de pylônes)	as usual	as usual	as usual	as usual	soutenue	soutenue
Active (partage de fréquences)	as usual	as usual	as usual	as usual	soutenue	soutenue
Demande et panier de services ("as usual" : tendances et stratégies actuelles)						
Trafic - performances	maximales	as usual	as usual	maximales	as usual	raisonnées
Trafic - quantité	maximale	as usual	as usual	maximale	as usual	raisonnée
Trafic - IoT, IIoT	flux vidéo	as usual	as usual	as usual	as usual	réduit
Gestion de la variabilité temporelle	surdimensionner	as usual	as usual	surdimensionner	as usual	limitation des pics

Tableau 1 – Caractérisation des scénarios de spécifications et de déploiement des réseaux
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Plusieurs scénarios ont été construits autour de la combinaison des spécificités techniques et de déploiement possibles pour les réseaux d'accès mobiles (Tableau 1) :

- **Les spécificités relevant des stratégies (économiques et politiques) de déploiement des réseaux au vu des enjeux de couverture (générale ou différenciée) :**
 - **Calendrier de déploiement** (démarrage, objectifs, trajectoire) des équipements réseaux des différentes générations d'ici 2030 (5G selon les différentes bandes en cours de déploiement : 700 & 800 MHz, 1800 & 2100 MHz, 3500 MHz ; 5G selon les bandes en expérimentation : 3,8-4 GHz et 26 GHz ; 6G selon les options de développement possibles et les bandes de fréquences qui seront prochainement

choisies, favorisant uniquement l'efficacité énergétique ou un changement de paradigme) ;

- **Couverture du territoire et de la population**, qui représente les modulations possibles, entre les différents scénarios, de la répartition spatiale des sites mobiles. Elle est décrite par le nombre de sites et leur répartition sur le territoire ;
- **Couverture des routes, autoroutes et axes ferroviaires** ;
- **Services industriels et professionnels différenciés**, qui couvrent les déploiements de réseaux mobiles sur les zones industrielles et d'activités identifiées comme étant à usages connectés d'intérêt particulier dans le cahier des charges de l'Arcep (industrie automobile, industrie haute précision, santé) appuyés sur la technologie du *slicing*³ (Arcep, 2019) .
- **Agriculture connectée aux réseaux mobiles**, qui couvre les applications d'agriculture nécessitant un accès au réseau (monitoring en temps réel des variables environnementales des exploitations, déploiement de capteurs connectés etc.) ;
- **Les spécificités relevant des choix des acteurs se trouvant du côté de l'offre (opérateurs), traduites par le niveau de mutualisation des sites mobiles :**
 - **Mutualisation passive**, qui désigne une mise en commun des pylônes ou mâts utilisés pour déployer les antennes et équipements réseau des différents opérateurs ;
 - **Mutualisation active**, qui désigne une mise en commun des antennes et équipements réseaux déployés sur un même pylône ou mat, avec modalités de partage de l'usage des fréquences par les différents opérateurs ;
- **Les spécificités relevant du niveau et du type de demande (usages et services possibles) :**
 - **Trafic – performances** : désigne les niveaux de spécifications techniques du transfert de données en moyenne sur le réseau mobile dans son ensemble (débit, latence et fiabilité)⁴ ;
 - **Trafic – quantité** : traduit l'évolution du volume moyen de données transitant sur le réseau. Il est lié à l'évolution de trois paramètres : l'intensité d'utilisation (nombre d'heure d'utilisation par personne), le nombre de personnes utilisatrices du réseaux mobiles (c'est-à-dire abonnées à une offre mobile) et l'intensité en données des usages mobiles (par exemple, les usages vidéo sont davantage intense que les usages reposant sur du contenu textuel sans image) ;
 - **Trafic dû à l'Internet des objets (IoT⁵ et IIoT⁶)** : traduit l'évolution du volume moyen de données transitant sur le réseau dans le cadre d'applications s'appuyant sur un grand nombre d'objets équipés de capteurs, actionneurs et connectés au réseau afin de rendre des services de manière automatisée et optimisée

³ Technologie de découpage virtuel du réseau en tranches pour en adapter les caractéristiques et la qualité de service aux besoins différenciés des utilisateurs (haut débit ou faible latence et haute fiabilité ou plus grand nombre d'objets connectés).

⁴ A noter qu'il serait techniquement possible de définir et répartir le trafic en différentes catégories, ces catégories de trafic pouvant être transférées sur des tranches de réseaux différentes (fonctionnalité de *slicing* déployées pour l'ensemble des utilisateurs).

⁵ IoT : Internet of Things

⁶ IIoT : Industrial Internet of Things

(domotique, chaînes logistiques, chaînes de montage industrielles etc.). Ces applications engendrent des besoins de communication importants de machine à machine (« *machine to machine* », ou M2M), dont l'évolution est liée à celle de trois paramètres : le niveau de déploiement de ces solutions dans les différents secteurs d'activité, qui peut être massif (nombre d'objets déployés), l'intensité en données des services rendus (volumes d'acquisition de données nécessaires) et les modalités de traitement de ces données (niveau d'archivage des données acquises, capacités de calculs déportées ou non).

- **Gestion de la variabilité temporelle**, qui couvre l'ensemble des stratégies de dimensionnement au vu des variabilités temporelles de taux de charge des sites : dimensionnement au pic ou non, stratégie de modulation heures creuses / heures pleines.

Ces trois familles de spécificités sont traduites au sein du modèle en variables permettant de construire les différents scénarios quantitatifs.

DIFFÉRENTS DEGRÉS DE PARTAGE DE RÉSEAUX

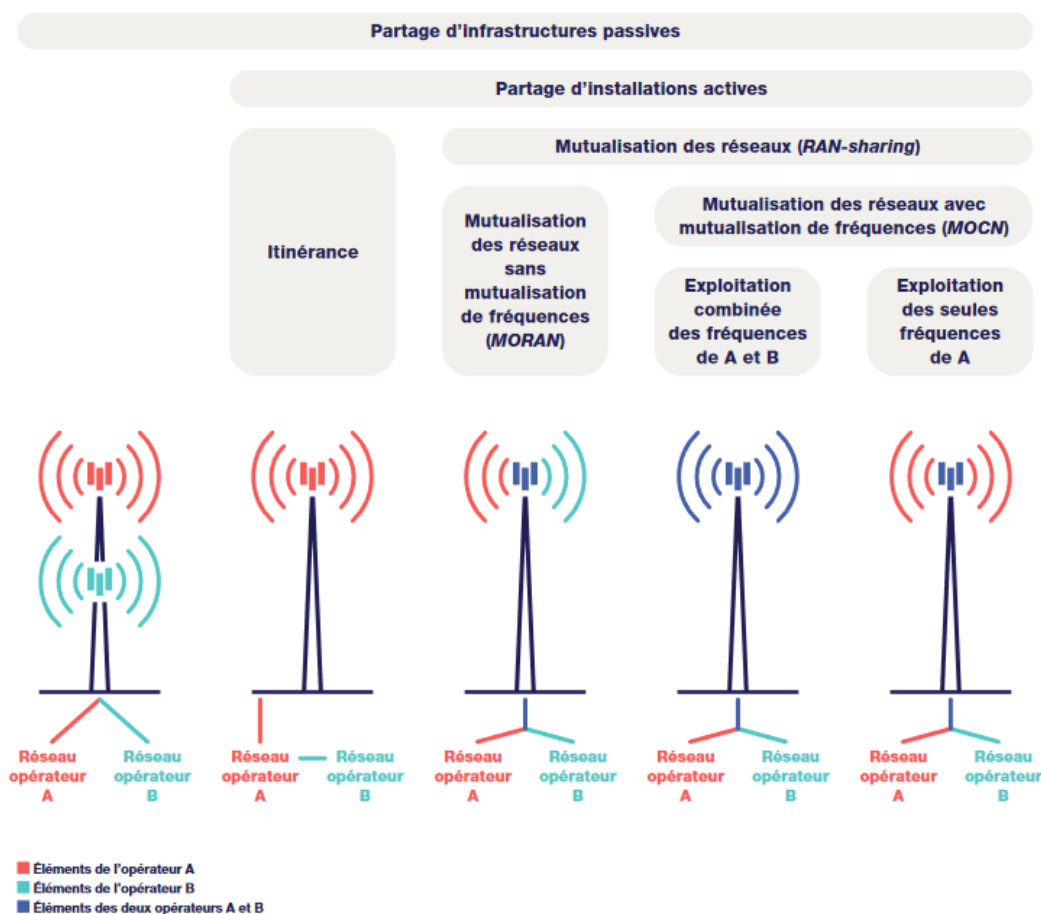


Figure 4 – Modalités possibles de mutualisation des infrastructures réseaux mobiles
Source : (Arcep, 2023c)

Ce sont les combinaisons possibles de ces variables qui mène aux scénarios identifiés, et non l'inverse : la démarche choisie dans cette étude vise à éclairer sur les conséquences

des choix techniques et stratégiques effectués sur les infrastructures. Chacun de ces scénarios permet ainsi de mettre en évidence les effets macroscopiques de ces décisions sur le dimensionnement global du réseau mobile, en décrivant les archétypes de dynamiques qui en résultent (Tableau 2).

Scénarios réseaux mobiles						
	Maximaliste	Cahier des charges actuel	Zéro zone blanche	Urbain	Mutualisé	Un sobre
Stratégies de déploiement et enjeux sociétaux Objectifs des déploiements :	Couvrir l'intégralité du territoire (routes, rural etc.) et déployer tous les usages promis.	Couvrir le territoire selon les priorités énoncées dans le cahier des charges de l'Arcep sur la 5G.	Priorité donnée à la couverture de toute la population, devant d'autres usages (routes, agriculture).	Priorité donnée à la couverture des zones urbaines, à plus forte intensité d'usages.	Couvrir le territoire selon les priorités énoncées dans le cahier des charges de l'Arcep sur la 5G.	Cahier des charges du déploiement 5G et 6G repensé : recentrage sur les zones et services déjà identifiés comme prioritaires.
Offre Dynamiques de mutualisation :	Dynamique de mutualisation tendancielle.	Dynamique de mutualisation tendancielle.	Dynamique de mutualisation tendancielle.	Dynamique de mutualisation tendancielle.	Stratégie d'augmentation du degré de mutualisation.	Stratégie d'augmentation du degré de mutualisation.
Demande et panier de services Objectifs du dimensionnement réseau :	Permettre le niveau de service optimal à tout instant, en tout point, pour tous les nouveaux usages.	Absorber les dynamiques tendanciennes de développement des usages.	Absorber les dynamiques tendanciennes de développement des usages.	Permettre le niveau de service optimal à tout instant en zone urbaine, pour la plupart des nouveaux usages.	Absorber les dynamiques tendanciennes de développement des usages.	A partir des contraintes physiques, pour assurer la résilience des usages essentiels.

Tableau 2 – Description des dynamiques des scénarios de spécifications et de déploiement des réseaux
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

La trajectoire sobre n'est à ce stade qu'une illustration du type de dynamiques que pourrait proposer **l'une des trajectoires compatibles avec la sobriété numérique et les contraintes physiques. C'est l'approche par « backcasting » qui permettra de formuler les conditions de pertinence de trajectoires pour les infrastructures réseaux et donc de décrire de véritables scénarios sobres.** Au moment de la publication de ce rapport intermédiaire, les modélisations afférentes n'ont pas été réalisées. Les deux parties suivantes de ce rapport en présente la méthode, ainsi que les choix méthodologiques retenus dans le cadre de cette étude.

Résultats des projections

Les projections quantitatives seront réalisées suite à ce rapport intermédiaire, dont l'objectif est d'amorcer des échanges sur la structure du modèle et l'approche retenue.

L'approche en « backcasting » : outil de construction d'un numérique sobre

Deux dimensions structurent le cadre méthodologique de notre analyse prospective des infrastructures réseaux⁷ :

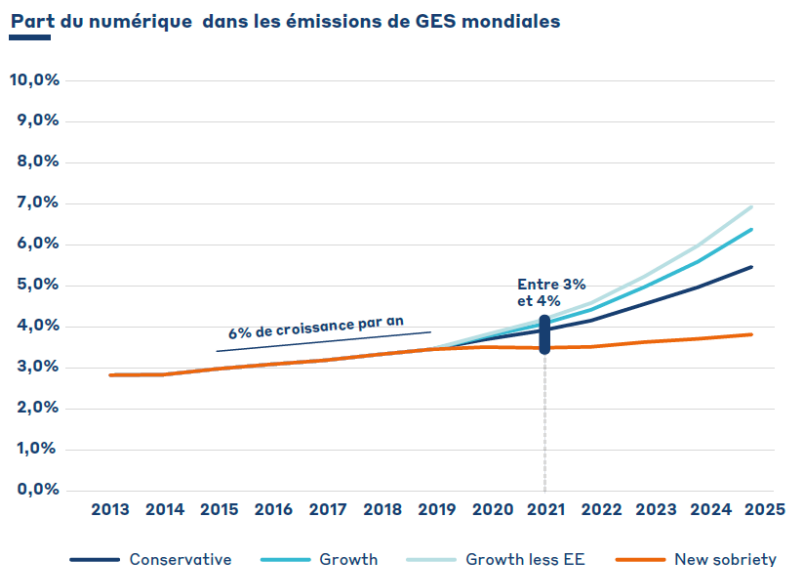
- Le choix de **l'approche prospective** : « *forecasting* » ou « *backcasting* » ;
- Le choix de **la méthode de modélisation** : « *attributionnelle* » ou « *conséquentielle* ».

Les choix de méthode de modélisation et leurs conséquences méthodologiques sont détaillés dans la partie « Description de l'outil de modélisation : périmètre, méthodologie, structure et applications possibles » (p. 22 de ce rapport).

Cette partie vise à expliciter ce qu'implique chacune des deux approches prospectives, « *forecasting* » et « *backcasting* », qui permettent de répondre à des questions différentes.

L'approche « forecasting » : projeter les tendances

L'approche « forecasting » consiste ici à projeter, à un horizon temporel défini, les dynamiques des variables clés du système numérique (flux de données, consommations électriques, consommations énergétiques etc.), selon des tendances qui caractérisent les scénarios étudiés (*business as usual*, rythme plus ou moins soutenus de l'amélioration de l'efficacité énergétique, rythme plus ou moins soutenu de l'augmentation des flux de données etc.).



⁷ Ces éléments ne sont pas propres à la prospective réseaux, et se caractérisent de la même manière pour des exercices prospectifs pouvant être appliqués à tout autre type de systèmes : mobilité, alimentaires, bâtiment, urbains, territoriaux régionaux, nationaux ou internationaux etc.

Figure 5 – Projection à 2025 de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales, approche forecasting

Source : (The Shift Project, 2021)

C'est l'approche retenue pour les projections de 2018 et 2021 de The Shift Project sur les infrastructures réseaux, les terminaux et les centres de données (The Shift Project, 2018, 2021). Elle permet de **décrire l'état des lieux, constat de la situation actuelle utilisée comme référence et point de départ, et de mettre en lumière deux éléments** :

- **Les points d'atterrissage possibles** : dans nos projections de 2021, les quatre scénarios construits (Conservative, Growth, Growth less EE, New sobriety) décrivent des dynamiques menant à une part du numérique dans les émissions mondiales en 2025 allant de 4 % à 7 % (Figure 5) ;
- **Les dynamiques influant le plus sur la trajectoire** effectivement prise par le système numérique (Tableau 3).

Scénarios	Efficacité énergétique	Trafic de données	Production d'équipements ¹¹
Conservative	Rythme historique	Rythme modéré	Rythme modéré
Growth	Rythme historique	Rythme soutenu	Rythme soutenu
Growth less EE	Léger ralentissement	Rythme soutenu	Rythme soutenu
New sobriety	Rythme historique	Décélération	Décélération

Tableau 3 – Description des scénarios de The Shift Project, projections 2021, approche forecasting

Source : (The Shift Project, 2021)

Cette approche vise à **décrire le point d'atterrissage auquel amène la tendance actuelle, ses composantes déterminantes principales ainsi que les trajectoires sur lesquelles nous placent leurs variations possibles**. La question à laquelle répond l'approche « forecasting » peut ainsi être synthétisée de la manière suivante :

« Les dynamiques actuelles du numérique le placent-ils sur des trajectoires soutenables ?
Quels phénomènes dimensionnants peuvent les infléchir, à la hausse ou à la baisse ? »

L'approche « backcasting » : dimensionner au vu des contraintes

L'approche « backcasting » consiste ici à caractériser les formes que peut prendre le système numérique dans les décennies à venir, une fois les contraintes physiques de réduction des émissions et de la consommation d'énergies fossiles prises en compte.

Ici appliquée aux réseaux, elle consiste en la **description des combinaisons de spécificités techniques possibles pour des infrastructures rendues compatibles avec l'objectif 2°C de l'Accord de Paris**. A partir de l'objectif de réduction des émissions appliquées au secteur du numérique (- 45 % dans le Monde, - 30 % en France, d'ici 2030 par rapport à 2020⁸) (SBTi et al., 2020; The Shift Project, 2023a), **plusieurs scénarios admissibles peuvent être construits** afin d'illustrer les agencements et **arbitrages possibles entre les différentes spécifications techniques et de déploiement des infrastructures** : couverture en territoire et

⁸ Voir le détail de la construction de cet objectif dans la partie « Une trajectoire insoutenable à infléchir », p. 5 de ce rapport.

en population, calendrier de déploiement, niveau de mutualisation, richesse du signal, intensité d'usages, débit latence etc.

Les scénarios construits dans le cadre de ce rapport sont structurés autour de ces composantes-clés de arbitrages à venir⁹ et permettront de tracer les contours des choix stratégiques qui seront déterminants dans la trajectoire à 2030 du système numérique.

Les modélisations n'ayant pas encore abouti au moment de la publication de ce rapport intermédiaire, l'avis critique des parties prenantes du secteur est particulièrement appelé par The Shift Project sur l'approche retenue, ainsi que sur les choix d'éléments structurant les scénarios (partie « Approche par scénarios : des choix-clés qui déterminent le dimensionnement des réseaux futurs », p. 15 de ce rapport.).

Description de l'outil de modélisation : périmètre, méthodologie, structure et applications possibles

Structure et méthode générales

L'outil de modélisation sur lequel s'appuient les résultats quantitatifs construits dans le cadre de ces travaux est conçu de manière à répondre à la question de recherche suivante :

« Quelles sont les conséquences des choix de déploiement et de spécifications techniques sur les impacts carbone et énergie des réseaux mobiles, ainsi que sur leur capacité à adopter une trajectoire compatible avec l'objectif de réduction des émissions du secteur à 2030 ? »

Ce modèle, centré sur la mise à jour et la consolidation de la brique « mobile » de nos modélisations des infrastructures réseaux¹⁰, vise à décrire les interactions entre (Figure 6) :

- Les choix de déploiement et de spécifications techniques (« Partie amont ») ;
- Les évolutions d'usages, en quantité et en niveau d'exigence technique (« Partie amont ») ;
- Les besoins infrastructurels qui en découlent (« Partie amont ») ;
- L'empreinte carbone/énergie résultant de l'infrastructure effectivement déployée dans le scénario étudié (« Partie aval »).

Les trajectoires d'évolutions possibles des usages et de la demande résultante sont construites en parallèle des travaux menés sur les mondes virtuels (The Shift Project, 2023b) afin de coupler les deux approches développées par The Shift Project sur le système numérique : celle dont le point de départ est la conformation des infrastructures techniques (ici, les réseaux) et celle dont le point de départ est la compréhension des usages et de leurs logiques de développement (ici, les mondes virtuels). C'est cette double approche qui nous permet de documenter les interactions entre dynamiques sociétales et dynamiques physiques.

⁹ Comme détaillé dans la partie « Approche par scénarios : des choix-clés qui déterminent le dimensionnement des réseaux futurs », p. 9 de ce rapport.

¹⁰ Détails sur le choix du périmètre technologique dans la partie « Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des réseaux », page 6 de ce rapport.

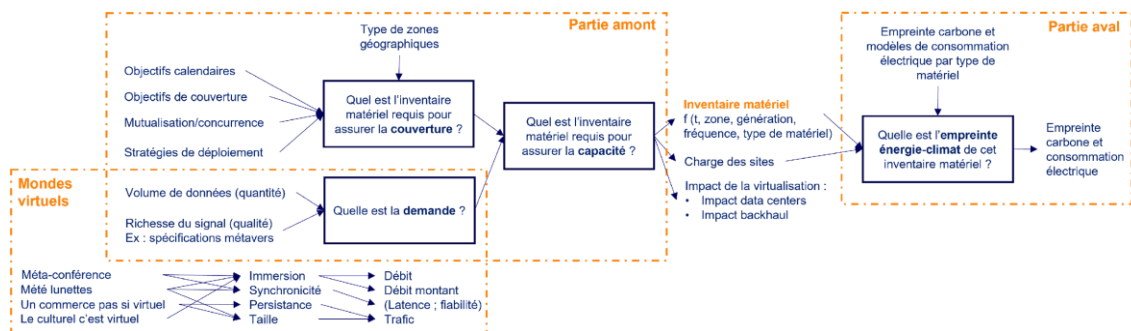


Figure 6 – Schéma fonctionnel du modèle « Réseaux mobiles » de The Shift Project et liens avec le rapport sur les mondes virtuels (The Shift Project, 2023b)
 Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Le modèle est structuré de manière à être applicable à différents contextes géographiques : si le cas français métropolitain sert de base à l’analyse quantitative développée dans ce rapport, **l’objectif de ces travaux est bien de produire des outils qui permettent d’éclairer les choix clés du système numérique au niveau des pays européens et, à terme, de l’Europe dans son ensemble.**

La méthode de modélisation conséquentielle : éclairer les choix plutôt que décrire les tendances

Au choix méthodologique de l’approche prospective choisie (forecasting ou backcasting) s’ajoute une seconde dimension méthodologique, au niveau du paradigme de modélisation.

L’analyse prospective des dynamiques d’impact des infrastructures réseaux peut s’appuyer sur deux méthodes différentes : « attributionnelle » ou « conséquentielle »¹¹. Chacune d’elles est adaptée à l’éclairage de questions différentes.

Méthode attributionnelle

Cette méthode vise à construire une **vision tendancielle des dynamiques des infrastructures** (flux de données, consommations électriques, consommations énergétiques etc.) **au vu des usages qui les pilotent au long cours.**

Pour ce faire, elle s’appuie sur une vision linéarisée :

- En partant des données macroscopiques qui caractérisent les infrastructures ;
Pour exemple très simplifié : le trafic de données total sur une infrastructure en GB, et la consommation électrique totale de cette infrastructure en kWh.
- Sur cette base, des ratios sont construits. Ce qu’ils décrivent, c’est en fait la part de « responsabilité » d’un usage donné sur l’impact carbone-énergie de l’infrastructure, en ce qu’il justifie l’existence du réseau à hauteur du niveau de sollicitation qu’il en fait.
Dans notre exemple très simplifié : consommation électrique par volume unitaire de données transféré, en kWh/GB. Ainsi, l’infrastructure étant déployée pour rendre possible

¹¹ Cette réflexion s’appuie sur les travaux menés sur les analyses de cycle de vie attributionnelles et conséquentielle (Schaubroeck et al., 2021).

la transmission de données, on considère que chaque GB qui transite est responsable d'une part de la consommation totale de l'infrastructure.

- L'évolution des tendances d'impacts carbone-énergie sont extrapolées à partir de ces ratios, suivant les scénarios choisis d'évolution des usages et d'évolutions des variables impactant les ratios eux-mêmes.

Dans notre exemple très simplifié, on modifiera par exemple la valeur du ratio en kWh/GB selon le scénario d'évolution de l'efficacité énergétique au cours du temps, et on obtiendra la projection de la consommation totale de l'infrastructure par le produit de ce nouveau ratio avec le trafic de données prévu.

La modélisation ne cherche alors pas à décrire les interactions qui lient d'un point de vue technique les usages à leurs impacts carbone et énergie, mais à décrire comment les évolutions des volumes sur plusieurs années mènent en moyenne à une évolution des impacts. Derrière cette linéarisation se cache la réalité du déploiement des infrastructures, davantage prise en compte via la méthode conséquentielle.

Méthode conséquentielle

Cette méthode vise à décrire les effets de choix stratégiques (couverture, spécifications techniques etc.) sur les infrastructures (nombre de points hauts, nombre et type d'équipements réseaux déployés etc.) et leurs impacts (dans notre approche : carbone et énergie).

Les impacts carbone-énergie de l'infrastructure réseau comportent deux composantes, de natures différentes (Guennebaud et al., 2023) :

- **La part fixe**, dont l'évolution est uniquement liée au rythme et aux modalités de déploiement (couverture, nombre et type d'équipements déployés) ;
- **La part variable**, dont l'évolution est liée au niveau de sollicitation de l'infrastructure (taux de charge des sites, volume du trafic de données).

La part fixe intègre les impacts carbone-énergie de production et déploiement des infrastructures réseaux, ainsi qu'une partie de leur consommation électrique et des émissions induites, qui représentent plus de 90 % de l'impact carbone total des infrastructures réseaux dans le Monde (The Shift Project, 2021).

La part fixe de la consommation électrique des réseaux, et donc des émissions carbonées qui en découlent, est prépondérante dans la consommation totale des infrastructures (Guennebaud et al., 2023) : une fois les équipements déployés (fibre, antennes, équipements réseau cœur et réseau d'accès etc.), une alimentation est nécessaire en continu pour les maintenir en fonctionnement. C'est à cette base que vient s'ajouter la consommation variable, résultant du transit de données. Cette part variable est d'un poids relatif faible dans la consommation totale, bien que les nouvelles générations de réseaux mobiles tendent à en augmenter l'importance, notamment pour une meilleure pilotabilité (Guennebaud et al., 2023).

Dans la méthode attributionnelle, la part fixe est imputée proportionnellement à la sollicitation de l'infrastructure, pour traduire la « part de responsabilité » de l'usage dans la justification du dimensionnement de l'infrastructure.

Dans la méthode conséquentielle, l'objectif est de traduire ce qu'impliquent les décisions de déploiement, qui sont dimensionnantes dans la consommation électrique et les impacts carbone du réseau. Il s'agit de **modéliser les conditions appelant à de nouveaux déploiements** :

- Risques de saturation et de perte en qualité de service (en débit, en capacité de connexions simultanées etc.) ;
- Volonté de permettre de nouveaux usages et services appelant de nouvelles spécifications techniques (latences plus faibles, débits montants et descendants plus importants etc.) ;
- Décision de couvrir des zones définies du territoire ou une part définie de la population avec un certain niveau de service.

La modélisation consiste donc, dans cette méthode, à projeter les évolutions des variables motivant le déploiement et les modalités de déploiement de nouvelles infrastructures réseaux. Ce sont elles que l'on retrouve en amont de la partie « amont » de notre modèle (Figure 6).

Synthèse des choix de modélisation et prochaines étapes

Les travaux réalisés à ce stade des travaux, au moment de la publication de ce rapport intermédiaire, visent à produire un outil de modélisation des réseaux d'accès mobiles permettant de déployer **une approche prospective de type « backcasting » sur la base d'une modélisation conséquentielle**. Ceci afin de pouvoir produire des recommandations éclairées sur les conditions de pertinence à prendre en compte dans le déploiement d'infrastructures réseaux que l'on vise à rendre résilientes vis-à-vis de la double contrainte carbone.

Les prochaines étapes des travaux viseront à produire, pour le rapport final, des analyses quantitatives illustrant les dynamiques et trajectoires sur lesquelles se placent nos réseaux à 2030 suivant les partis stratégiques et techniques qui seront pris par les pouvoirs publics et les acteurs du secteur dans les années à venir.

Description du modèle

Le cas d'étude français et la structure du modèle

L'outil est à ce stade construit sur la base du cas d'étude français, pour devenir paramétrable ensuite afin de pouvoir être appliqué à différentes zones et contextes.

Afin de modéliser l'évolution des réseaux mobiles en France métropolitaine à l'horizon 2030, on se place dans un marché se divisant entre quatre opérateurs génériques identiques, offrant des services de réseaux mobiles sur le territoire. On considère l'un de ces opérateurs générique, opérateur *moyen* n'ayant pas vocation à être comparé à un opérateur existant mais qui permet d'obtenir des ordres de grandeur réalistes quant aux résultats obtenus en tenant compte de la segmentation du marché.

L'opérateur générique doit répondre à un certain nombre de contraintes pour déployer ses sites et adopter une certaine stratégie de déploiement au cours du temps. Les contraintes principales considérées sont :

- Les caractéristiques du territoire,
- La demande de trafic de données,
- Les contraintes de couverture,
- Les caractéristiques du réseau.

Ce sont, avec la période temporelle considérée, les entrées de notre modèle. Les sorties du modèle sont des indicateurs d'impacts environnementaux carbone et énergie, calculés dans la "Partie aval" du modèle (Figure 6).

Le modèle étudié se décompose en quatre grandes parties :

- La définition de la demande,
- Le modèle de couverture,
- Le modèle de capacité,
- Le modèle environnemental.

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 $t_{6G} = 2030$ ¹². L'introduction des petites cellules 5G en ondes millimétriques est prévue dans le modèle à la date $t_{mmw} = 2026$ ¹³.

Les caractéristiques du territoire. La France métropolitaine est divisée en $N_z = 6$ zones géographiques de densités croissantes :

- EMPTY,
- RURAL_LOW,
- RURAL,
- PERI_URBAN,
- URBAN,
- DENSE_URBAN.

Chaque zone géographique i est caractérisée par une population en 2024 p_i 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 ont 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 en 2024 : $P(t) = \sum_{i=0}^{N_z-1} p_i(t)$. La somme des superficies des zones $S = \sum_{i=0}^{N_z-1} s_i$ est quant à elle légèrement supérieur 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-

¹² La normalisation de la 6G étant envisagée à horizon 2028-2029 par l'Arcep (Arcep, 2022, p. 8).

¹³ Cette date est cohérente avec les timings de déploiement des bandes de fréquences déjà attribuée (Arcep, 2019).

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
N_z	Nombre de zones géographiques	6
$[p_i(t_0), s_i]$	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	$210,2 \cdot 10^3$
$P(t_0)$	Population totale à t_0 (en millions)	63
S	Superficie totale de la France métropolitaine en km ²	564 654

Tableau 4 – 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 habitant¹⁴ et par mois. 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. La Figure 8 (voir «

¹⁴ 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.

Annexe – Données complémentaires ») 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 : $V(t) = V_T + \alpha_T (t - t_0)$. 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 . Le trafic de données en Mbits/s dans la zone géographique i qui devra être servi par l'opérateur générique avec la technologie $\tau \in \{4G, 5G, 6G\}$ à la date t est donc :

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

Paramètre	Description	Valeur par défaut
N_{OP}	Nombre d'opérateurs	4
V_0	Volume moyen de données consommées par habitant et par mois au temps t_0 (en Go/mois)	20 (Arcep, 2023d) et voir « Annexe – Données complémentaires »
α_T	Facteur d'accroissement annuel du trafic de données	2.59 (Arcep, 2023d) et voir « Annexe – Données complémentaires »
ρ_{BH}	Proportion de données consommées à l'heure chargée	9,4 % (Arcep, 2023b)
$\rho_{4G}^{(i)}(t), \rho_{5G}^{(i)}(t), \rho_{6G}^{(i)}(t)$	Proportion de trafic alloué à chaque technologie dans la zone géographique i à la date t	<i>A déterminer, voir méthodologie</i>

Tableau 5 – 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. 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 résulter de l'attribution de fréquences par le régulateur et constituer ainsi des obligations légales. 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 . 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 (RURAL) (Arcep, 2023a).

Paramètre	Description	Valeur par défaut
$\beta_{\tau}^{(s)}(t), \beta_{\tau}^{(p)}(t)$	Proportions de la superficie et de la population qui doit être couvertes par la technologie τ à la date t	<i>A déterminer, voir méthodologie</i>
$r_{5G,upper_mid}(t)$	Nombre minimal de sites 5G	8000 pour $t = 2024$, 10 500

	déployés dans la bande UPPER_MID	pour $t = 2025$
ρ_r	Proportion des sites 5G déployés en zone rurale (RURAL)	0,25

Tableau 6 – 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. 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} .

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.
- 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.
- 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 2023¹⁵. On suppose que les bandes LOW, LOWER_MID, UPPER_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. 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 $W_{b,\tau,i}(t) = \rho_\tau^{(i)}(t)W_b$ proportionnelle à la quantité de trafic pour cette technologie dans cette zone.

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.

¹⁵ Hypothèse à préciser pour la bande HIGH et pour la bande 6 GHz.

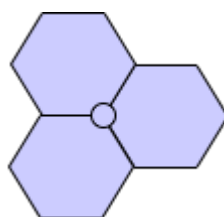


Figure 7 – Représentation graphique d'un site tri-sectorisé
Source : The Shift Project, dans el cadre de ce rapport

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 . On utilise par défaut les valeurs de l'Arcep (Arcep, 2023c) en identifiant les zones denses de cette référence à nos zones DENSE_URBAN, URBAN et PERI-URBAN, la zone intermédiaire à RURAL et les zones peu denses à EMPTY et RURAL_LOW.

Paramètre	Description	Valeur par défaut
N_{tech}	Nombre de technologies de réseaux mobiles	3
t_{6G}	Date des premiers déploiements 6G	2030
N_{band}	Nombres de bandes de fréquences disponibles	4
W_b	Largeur de bande pour la bande b en MHz	[23,74 ; 51,25 ; 77,5 ; 400]
$W_{b,\tau,i}(t)$	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
$n_{sh}^{(i)}(t)$	Nombre moyen d'opérateurs par site dans la zone i à la date t	[2,22 ; 2,22 ; 1,70 ; 1,43 ; 1,43, 1,43]
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

Tableau 7 – 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 chacune des zones géographiques i et chacune des technologies 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 densification avec une marge d'interférence de 3 dB¹⁶.

Pour les deux zones rurales, ces rayons moyens ont été estimés à partir du nombre de sites en 2023 ayant au moins un système 4G ou 5G en bande LOW de l'opérateur Orange (jugé comme représentatif) dans ces zones et leur superficie respective en km². Pour les zones urbaines, le travail est à poursuivre suite à ce rapport intermédiaire.

[km]	EMPTY	RURAL_LOW	RURAL	PERI_URBAN	URBAN	DENSE_URBAN
4G/5G	4.4	4.4	2.85	1.7	1.2	1
6G	2.00	2.00	1.50	1.00	0.5	0.30

On définit une capacité cellulaire $c_{b,\tau}$ en Mbits/s/Hz 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, 2T2R ou 4T4R dans la bande LOWER_MID et 64T64R dans la bande UPPER_MID. Dans la bande LOWER_MID la proportion de la configuration la plus élevée croît avec le temps. 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
LTE FDD LOWER_MID 2T2R	35.0/20 = 1.75 Mbits/s/MHz
LTE FDD LOWER_MID 4T4R	52.5/20 = 2.625 Mbits/s/MHz
LTE FDD LOW 2T2R	35.0*0.8/20 = 1.4 Mbits/s/MHz
NR TDD UPPER_MID 32T32R	463.0/80 = 5.7875 Mbits/s/MHz
NR TDD UPPER_MID 64T64R	643.0/80 = 8.0375 Mbits/s/MHz

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 entrée les contraintes de couverture, les rayons de cellules dans la bande LOW et les caractéristiques des zones géographiques (superficie et population).

¹⁶ Ces hypothèses seront reprises et affinées suite à ce rapport intermédiaire.

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*). Le nombre de ces petites cellules est calculé en utilisant un ratio moyen par rapport au nombre de macro-cellules dans la zone DENSE_URBAN. 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-cellule. 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. 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. Le rapport UTAMO (Stobbe, L. et al., 2023) considère qu'en 2030 1 % et 0,1 % du territoire national seront respectivement couverts en *outdoor* et en *indoor* par ces petites cellules (tous opérateurs confondus).

Algorithme pour la bande LOW

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

- Calculer la population qui doit être couverte : $P(t) \times \beta_{\tau}^{(p)}(t)$
- Calculer la superficie qui doit être couverte : $A_S = S \times \beta_{\tau}^{(s)}(t)$
- 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 :
 - $A_P > A_S$: mettre à jour les superficies s_i en prenant en compte les contraintes de couverture de la population.
 - Sinon : 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.
- La superficie qui doit finalement être couverte pour respecter les contraintes de couverture en termes de population et de superficie est : $A = \max(A_P, A_S)$.
- 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 :

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

Pour la bande UPPER_MID, l'algorithme prend en compte les contraintes en termes de sites 5G déployés.

Algorithme pour la bande UPPER_MID.

Pour chaque année t :

- Convertir la contrainte en nombre de cellules :

$$n_{regul} = \max(r_{5G,upper_mid}(t), r_{5G,upper_mid}(t-1)) \times N_{sect}$$

- Répartir ce nombre en positionnant une proportion ρ_r dans les zones les moins denses (RURAL) et le reste dans les zones les plus denses (PERI_URBAN, URBAN, DENSE_URBAN). Dans chacun des groupes, répartir les cellules en proportion de la population. Pour les zones les moins denses, on obtient :

$$n_{UPPER_MID,5G}^{(i)}(t) = n_{regul} \times \rho_r \times p_i(t) \div \sum_{i=0}^2 p_i(t).$$

Pour les zones les plus denses, on obtient :

$$n_{UPPER_MID,5G}^{(i)}(t) = n_{regul} \times (1 - \rho_r) \times p_i(t) \div \sum_{i=3}^5 p_i(t)$$

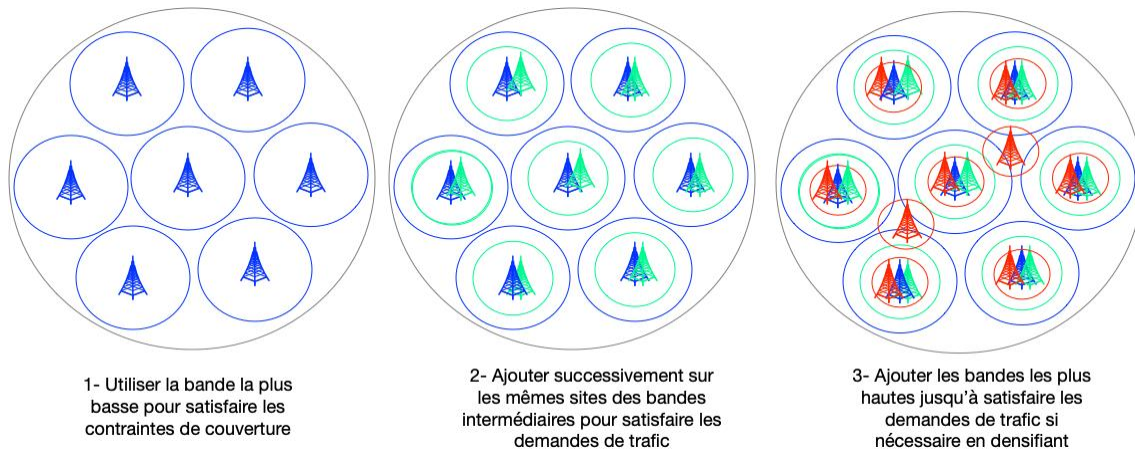
On obtient donc en sortie du modèle de capacité le nombre de cellules $n_{LOW,\tau}^{(i)}(t)$ à déployer à la date t pour chacune des technologies dans chacune des zones dans la bande LOW ainsi que le nombre de cellules $n_{UPPER_MID,5G}^{(i)}(t)$ à déployer à la date t pour la 5G dans la bande UPPER_MID.

Algorithme pour la bande HIGH.

Travaux à poursuivre suite à ce rapport intermédiaire.

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 et peut être déclinée de la manière suivante.



Algorithme de calcul du nombre de cellules.

Pour chaque année t , pour chaque technologie τ , pour chaque zone i :

- Calculer la capacité cellulaire dans chaque bande b en Mbits/s : $C_{b,\tau} = c_{b,\tau} \times W_{b,\tau,i}(t)$
- Le modèle de couverture a fourni un certain nombre de cellules dans les bandes LOW et UPPER_MID. On retranche de la demande de trafic la capacité offerte par ces cellules :

$$T_{i,\tau}(t) := \max(0, T_{i,\tau}(t) - \sum_{b=0}^{N_{band}-1} C_{b,\tau} \times n_{b,\tau}^{(i)}(t)).$$

- Tant que la demande de trafic résiduel $T_{i,\tau}(t)$ est non nulle :
 - Si on n'a pas atteint la bande la plus élevée pour τ :

- On ajoute le nombre de cellules nécessaires pour satisfaire $T_{i,\tau}(t)$ sans dépasser $n_{b-1,\tau}^{(i)}(t)$.
- On met à jour le trafic résiduel comme ci-dessus.
 - Sinon : on ajoute le nombre de cellules nécessaires pour satisfaire $T_{i,\tau}(t)$.
- On s'assure que le nombre de cellules n'est pas décroissant avec le temps :

$$n_{b,\tau}^{(i)}(t) := \max(n_{b,\tau}^{(i)}(t), n_{b,\tau}^{(i)}(t-1)).$$

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 est équipé d'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 une antenne passive par secteur. On suppose une antenne 2T2R pour la bande LOW. On suppose une antenne 2T2R ou 4T4R pour la bande LOWER_MID. Ces antennes passives sont capables de transmettre et recevoir dans l'ensemble des bandes considérées quelque soit la technologie. Les sites ayant des cellules dans les bandes UPPER_MID ont une 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 une antenne active AAU MIMO 64T64R.
- **RRU** : les sites ayant des cellules dans la bande LOW ont un RRU par secteur. Les sites ayant des cellules dans la bande LOWER_MID ont un RRU par secteur.
- **BBU** : les sites ayant des cellules dans les bandes LOW et LOWER_MID ont une BBU. Les sites ayant des cellules dans la bande UPPER_MID ont une BBU. Les sites ayant des cellules dans la bande HIGH ont une BBU.

- **Système de transmission vers le *backhaul*** : Chaque site est équipé d'un routeur. En outre, il est connecté au réseau de transport soit par un accès optique, soit par un accès par faisceau hertzien (FH). Dans le premier cas, le site possède une unité de réseau optique (Optical Network Unit). Dans le second cas, le site possède une carte de gestion de la transmission FH ainsi qu'une antenne FH.
- **Alimentation électrique** : chaque site possède un bloc d'alimentation électrique et un convertisseur AC/DC.
- **Une antenne GPS** pour la synchronisation.

03

**ADAPTER LES
INFRASTRUCTURES
RÉSEAUX À LA DOUBLE
CONTRAINTE CARBONE**

Adapter les infrastructures réseaux à la double contrainte carbone

Cette partie a pour objectif de synthétiser les recommandations et propositions basées sur les analyses quantitatives issues des modélisations détaillées plus haut dans ce rapport, une fois celles-ci réalisées.

A ce stade des travaux, au moment de la publication de ce rapport intermédiaire, il s'agit donc ici de présenter, de manière très synthétique et afin d'alimenter les échanges et retours lors des [ateliers collaboratifs du 14/12/2023](#), les grands axes de questionnements auquel nos travaux souhaitent répondre. Ces questions ont pour objectifs d'éclairer les parties prenantes du dimensionnement, du déploiement et de la gestion de nos infrastructures réseaux sur le cahier des charges à se donner si l'on souhaite doter nos usages numériques d'une colonne vertébrale adaptée aux enjeux énergie et climat des prochaines décennies.

Infrastructures réseaux : quels risques, quelle résilience ?

Les infrastructures réseaux font partie de nos infrastructures physiques. Elles sont soumises aux mêmes contraintes et enjeux de résilience que tous nos autres systèmes et doivent de fait, **si l'on souhaite en préserver les usages et apports essentiels, se doter d'une stratégie qui les rendent aussi affranchies et adaptées que possible aux nouveaux risques.**

Les risques liés à la double contrainte carbone sont **de deux natures** :

- **Les risques physiques** :
 - Variations croissantes des conditions météorologiques dans un climat instable et des **événements extrêmes** qui en résultent (risques de dommages pour les points hauts et les infrastructures fixes en cas de tempête, d'incendie ou d'inondation par exemple) ;
 - **Risques sur l'approvisionnement en énergie** (contraintes sur les énergies fossiles, usages concurrents sur l'électricité etc.) ;
 - **Risques sur l'approvisionnement en matières premières** (approvisionnements fortement sensibles aux conditions géologiques, techniques, géopolitiques et

climatiques dans lesquelles se déploient les chaînes de valeur des métaux rares, du cuivre etc.) ;

- **Les risques de transition**, qui sont le résultat des transformations auxquelles sont soumises le reste de la société dans laquelle les infrastructures prennent place (évolutions réglementaires, modification de la demande et des usages, perturbations ou réorientations d'acteurs-clés dans les chaînes de valeur de sous-traitance ou de fournisseurs etc.).

Ces risques sont la manifestation du degré croissant d'incertitude dans lequel sont plongés tous les secteurs d'activités, aujourd'hui et pour les années à venir. Ils peuvent se traduire en **phénomènes brutaux** (crises d'approvisionnement en semi-conducteurs, inondations, délestages du réseau électrique et donc coupure d'approvisionnement pour les points hauts etc.) ou en **phénomènes tendanciels** (perturbation croissante des chaînes de valeurs nécessaire à la maintenance et au renouvellement des équipements, volatilité croissante des prix et de l'accessibilité des matériaux et composants etc.).

Les parties prenantes de la maintenance et de l'évolution de nos infrastructures réseaux doivent donc documenter les questions suivantes, que nos modélisations viseront à éclairer une première fois :

- La stratégie maximaliste (Tableau 1, Tableau 2), qui vise à déployer nos réseaux de la manière la plus large possible afin de permettre le maximum d'applications potentielles (y compris non encore identifiées), est-elle mère de nouvelles brèches importantes de résilience ?
- Quels convergences et divergences y a-t-il entre la résilience aux risques climatiques et d'approvisionnement et celle à la double contrainte carbone (par exemple, la redondance pourrait entrer en conflit avec l'efficacité et la sobriété énergie-carbone, mais un système plus sobre et moins dépendant des intrants pourrait rendre plus résilients les usages qu'il permet) ?

Planifier la complémentarité des réseaux

Les travaux quantitatifs développés dans ce rapport ont visé la modélisation des réseaux mobiles, en tant que brique essentielle des choix stratégiques encore à trancher dans les prochaines années sur nos infrastructures. Cette analyse a cependant bien pour objectif d'éclairer la place des réseaux mobiles au sein de l'infrastructure réseau dans son intégralité.

Les recommandations qui seront formulées à l'issue des travaux complémentaires à ce rapport intermédiaire interrogeront ainsi le dimensionnement et la cohérence des différentes composantes de l'infrastructure :

- **Les réseaux mobiles**, dont les décisions structurantes à 2030 et 2050 seront prises dans les prochaines années ;
- **Les réseaux fixes (filaire et wifi)**, dont les calendriers et modalités de déploiement sont en grande partie fixés à moyenne échéance ;
- **Les réseaux satellitaires**, dont l'essor récent crée la possibilité d'une nouvelle infrastructure, aux technologies de déploiement radicalement différentes, mais aux

logiques stratégiques (choix des spécificités en couverture, niveau de service, richesse du signal, latence etc.) de même nature que les réseaux terrestres.

Parmi les questions qui seront posées dans la suite de nos travaux, celle de l'agencement de ces différents modes d'accès à la connectivité sera centrale : les infrastructures réseaux peuvent-elles être complémentaires dans un objectif de structuration d'une infrastructure décarbonée et résiliente ?

Les satellites et constellations de satellites de télécommunications

L'objectif des travaux qui seront menés, suite à ce rapport intermédiaire, sur les réseaux satellites viseront à :

- Documenter l'empreinte carbone liées à la production, au déploiement et à l'opération des solutions satellites pour l'accès au réseau, en prenant en compte ses différents segments (satellite, lanceur, sol, utilisateur) ;
- Documenter les conditions de pertinence et de cohérence de cette infrastructure avec ses équivalents terrestres : superposition ou complémentarité, redondance ou convergence ?
- Eclairer la manière dont les choix de développement de ces solutions pourront altérer les logiques infrastructurelles et stratégiques des parties prenantes des réseaux, en modifiant les logiques de couverture, de niveau de service et les arbitrages identifiés au sein des scénarios pour les réseaux terrestres.

Quels leviers pour mener nos réseaux à un futur sobre et résilient ?

Planifier la décarbonation du système numérique

Au vu de la place centrale qu'occupent les technologies numériques dans nos usages essentiels (mobilité, interactions sociales, culturelles, chaînes de valeurs industrielles et circuits alimentaires, gouvernance et services publics etc.), **il est essentiel d'assimiler un constat aujourd'hui incontournable : un choix technologique est un choix sociétal.**

Dans nos rapports précédents, documentant la manière dont le débat sur la 5G s'était déroulé en 2020 (The Shift Project, 2021) ainsi que les leviers nécessaires à mettre en œuvre dès maintenant pour planifier la décarbonation du système numérique en France (The Shift Project, 2023a), nous préconisons de suivre les étapes de construction et déploiement d'une planification de la décarbonation du numérique :

- **Produire une trajectoire de référence** pour la décarbonation du secteur numérique, à intégrer dans la SNBC3 et dans les travaux de rebouclage du SGPE ;
- **Piloter les travaux de production de feuilles de route par les acteurs économiques du secteur et les territoires**, par déclinaison de la stratégie nationale consolidée ;
- **Créer un espace de concertation** (conventions citoyennes et des entreprises, auditions d'experts, missions institutionnelles et/ou autre modalité) ;

- **Assurer un suivi et un rebouclage des feuilles de route des acteurs** par les pouvoirs publics, basé sur des mesures et indicateurs quantitatifs standardisés validés par les sphères académiques et d'expertise.

Cette planification doit permettre de déployer les **quatre grandes familles de leviers à mobiliser pour décarboner le système numérique** :

- **La mesure et la transparence** : sans mesure, pas de priorisation éclairée possible. Sans transparence, pas de mesure ni d'ordres de grandeurs fiables à disposition ;
- **L'optimisation** : un levier complémentaire qui n'est véritablement utile qu'à services rendus constants, à coupler donc avec des mécanismes pour éviter les effets rebonds ;
- **La réorganisation collective des usages vers la sobriété** : c'est la transformation en rupture des usages et des modèles économiques, sans laquelle les objectifs de décarbonation ne peuvent être atteints ;
- **La formation et les compétences** : mettre effectivement en œuvre des feuilles de route au bon niveau d'ambition nécessite que les acteurs (industriels, opérateurs, entreprises et institutions) acquièrent et mobilisent les compétences et ressources humaines nécessaires.

Les prochaines étapes de nos travaux, qui feront suite à ce rapport intermédiaire, viseront à documenter la manière de traduire ces différents leviers sur la brique « réseaux ». Ceci en s'appuyant sur les nouvelles modélisations quantitatives effectuées sur les réseaux mobiles, couplées à l'analyse des enjeux des réseaux fixes et des nouvelles infrastructures satellitaires.

Il s'agira notamment de comprendre quel rôle peut avoir l'écosystème des parties prenantes des réseaux en France et en Europe dans cette transformation vers la décarbonation, quelles contraintes le structurent, quelles évolutions légales, réglementaires et de régulation peuvent aider à amorcer la transformation et quels leviers peuvent faciliter les changements sociétaux associés.

Permettre les conditions d'une discussions sociétale informée

Concevoir des espaces de co-construction des trajectoires et stratégies est indispensable si l'on souhaite assurer la bonne adéquation entre les spécificités de nos réseaux, les besoins auxquels ils répondent et les contraintes qui s'y appliquent. Ils doivent permettre d'aligner le niveau de connaissances des parties prenantes sur les sujets de décarbonation et résilience du numérique et d'animer un débat national sur la place du numérique dans la société transformée.

Ces espaces doivent être déployés en impliquant :

- Les pouvoirs publics,
- Les organes régulateurs,
- Les communautés professionnelles,
- Les entreprises fournisseurs et de services,
- La société civile,
- La société dans sa dimension plus large.

Les choix technologiques, peu importe la méthode de prise de décision, doivent être éclairés et alimentés d'une prise en compte des éléments sociétaux s'étant manifestés lors des débats des dernières années. **La transformation de nos systèmes numériques ne pourra se faire ni sur**

la base de leviers purement technologiques, ni sur celle de modifications comportementales exclusivement individuelles. Elle devra donc s'appuyer sur une méthode de coordination des parties prenantes permettant de traiter les points clés, à mettre en évidence.

Identifier ces enjeux est l'objectif des travaux qui seront menés par la suite sur la base des réflexions initiées dans ce rapport intermédiaire.

04

CONCLUSION

Conclusion

Les dynamiques du numérique sont aujourd'hui insoutenables vis-à-vis de la double contrainte carbone. Le secteur obéit à un réflexe de croissance de la taille de ses infrastructures et des systèmes d'usages associés, qui alimente une inflation de ses impacts trop rapide pour être contenue par des progrès technologiques et d'efficacité pourtant fulgurant.

Les technologies numériques sont aujourd'hui une pierre angulaire de nos sociétés et de leur capacité à fonctionner. Pour en faire un outil qui permette de repenser les modes de production et de consommation qui sous-tendent nos activités, plutôt qu'un simple accélérateur des modèles existants, il est essentiel de pousser la réflexion plus loin que ce que nous avons pu faire jusqu'ici : comprendre que l'évolution des systèmes techniques est indissociable de celle des systèmes d'usages et que notre infrastructure numérique ne sera rendue résiliente et décarbonée qu'au travers d'une réflexion méthodique et rigoureuse sur les usages qu'elle permet.

Faire l'économie de cette réflexion reviendrait à exposer le numérique aux risques des nouveaux aléas qui se présentent à lui, mettant ainsi en péril la pérennité et les apports essentiels de nos usages connectés.

Ce rapport intermédiaire présente la méthodologie choisie par The Shift Project pour répondre à la question des conditions de pertinence d'un réseau sobre et résilient à la double contrainte carbone. L'ambition de ce document est de permettre les échanges éclairés avec les parties prenantes de nos réseaux, afin d'alimenter la seconde phase de travail, qui visera à produire les évaluations et trajectoires quantitatives qui nous permettront de construire des propositions et points de repères stratégiques à destination des sphères décisionnelles, techniques et stratégiques des infrastructures réseaux en France, en Europe et dans le monde.

Ce travail sera poursuivi entre les ateliers collaboratifs du 14 décembre 2023 et la publication du rapport final au premier trimestre 2024, ainsi qu'au travers des travaux suivants de The Shift Project sur les caractéristiques d'un système européen adapté à la double contrainte carbone, sobre et résilient.



ANNEXE — DONNÉES COMPLEMENTAIRES



Annexe – Données complémentaires

Zone	Superficie (km2)	Population	Densité moyenne (en hab/km ²)
EMPTY	9 543	0	0
RURAL_LOW	298 628	4 937 016	17
RURAL	236 868	16 319 970	69
PERI_URBAN	15 561	18 340 795	1179
Total	564 654	62 936 885	

Tableau 8 – Statistiques en superficies et population des zones
Source : The Shift Project, à partir de (INSEE, 2023)

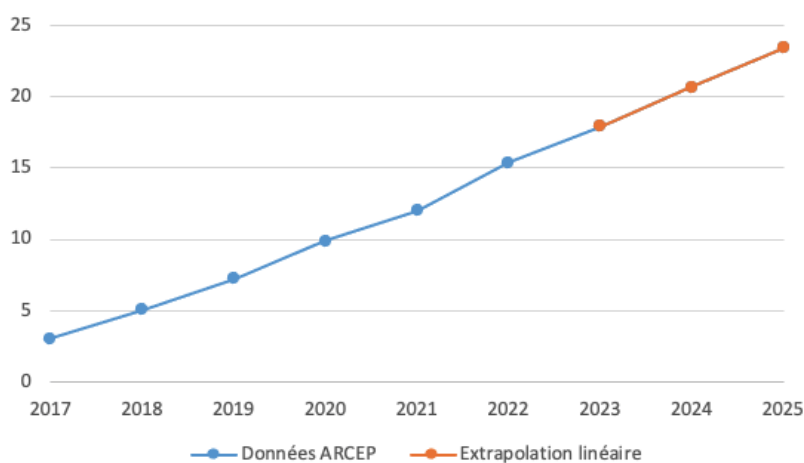


Figure 8 – Trafic mensuel par habitant (pour 63 millions d'habitants)
Source : (Arcep, 2023d)

RÉFÉRENCES

Références

ADEME, & Arcep. (2023). *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective—Analyse prospective à 2030 et 2050 (3/3)*. https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-prospective-2030-2050_mars2023.pdf

Arcep. (2019). *Décision n° 2019-1386 de l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse en date du 21 novembre 2019 proposant au ministre chargé des communications électroniques les modalités et les conditions d'attribution d'autorisations d'utilisation de fréquences dans la bande 3,4—3,8 GHz en France métropolitaine pour établir et exploiter un réseau radioélectrique mobile ouvert au public*. <https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiqués/detail/n/5g-7.html>

Arcep. (2022). *Préparer le futur des réseaux mobiles*. https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/consultation-nouvelles-frequences-services-mobiles_mai2022.pdf

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/l'empreinte-environnementale-du-numerique/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>

Arcep. (2023c). *Le partage de réseaux mobiles—Grand dossier—Réseaux mobiles*. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/le-partage-de-reseaux-mobiles.html>

Arcep. (2023d). *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>

Bol, D., Pirson, T., & Dekimpe, R. (2020). *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* (Electronic Circuits and Systems group, ICTEAM Institute, Université catholique de Louvain.).

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

European Commission. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market—Final study report*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market>

- Freitag C. et al. (2021). *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- GreenIT.fr. (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT.fr. <https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>
- Guennebaud et al. (2023). *Assessing VoD Pressure on Network Power Consumption*. <https://doi.org/10.1109/ICT4S58814.2023.00017>
- 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/>
- IEA. (2019). *Data centres and energy – from global headlines to local headaches?* <https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches>
- IEA. (2021). *Global CO2 emissions from transport by subsector, 2000-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-subsector-2000-2030>
- IEA. (2022). *Data Centres and Data Transmission Networks—Tracking report*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- INSEE. (2023). *Bilan démographique 2022*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6687000>
- ITU-T. (2020). *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement* [L.1470. Series L: environment and icts, climate change, e-waste, energy efficiency; construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1470-202001-l/en>
- Lunden D. et al. (2022). *Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators*. <https://doi.org/10.3390/su14052637>
- Malmodin J. et al. (2023). *ICT Sector Electricity Consumption and Greenhouse Gas Emissions—2020 Outcome*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4424264>
- Masanet et al. (2020). *Recalibrating global data center energy-use estimates* [Science, 367(6481), 984–986. doi:10.1126/science.aba3758]. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758>
- SBTi, ITU, GeSI, & GSMA. (2020). *Guidance for ICT companies setting science based targets—Mobile networks operators, fixed networks operators and data centres operators*. <https://sciencebasedtargets.org/sectors/ict>
- Schaubroeck et al. (2021). *Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions*. <https://doi.org/10.3390/su13137386>
- Sénat. (2020). *Pour une transition numérique écologique. Rapport d'information n°555 (2019-2020)*. https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555_mono.html
- Stobbe, L. et al. (2023). *Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland*.
- The Shift Project. (2018). *Lean ICT: Pour une sobriété numérique*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>
- The Shift Project. (2021). *Impact environnemental du numérique: Tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/impact-environnemental-du-numerique-5g-nouvelle-etude-du-shift/>

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

www.theshiftproject.org

Contacts :

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

Ilana Toledano

Responsable Communication