THE SHIFT PROJECT

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 FINAL - MARS 2024

Illustration couverture : Virgile Bellaiche

Avant-propos

Au sein de son programme de travail consacré aux **enjeux des technologies numériques vis-à-vis de la double contrainte carbone (réduire nos émissions carbonées, s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles)** The Shift Project a publié, au cours des dernières années, cinq 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)**
  Mise à jour des trajectoires à 2025 de l'impact énergie-carbone du numérique. 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.

- **Planifier la décarbonation du système numérique en France : cahier des charges (2023)**
  Note dressant l'état des lieux des dynamiques observées sur le numérique en France (consommation électrique, carbone), des risques et enjeux posés aux acteurs de la planification énergie-carbone du pays (RTE, SGPE etc.) et décrivant les familles de leviers à mobiliser pour rendre le numérique résilient à partir de sa description systémique.

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, l'impact des choix de déploiement qui y sont faits et les stratégies à mettre en œuvre pour les rendre résilientes à la double contrainte carbone, dont le présent document est le rapport final.

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.

Contributions aux travaux « réseaux mobiles »

Le groupe de travail « Réseaux mobiles »

Ingrid BUQUICCHIO (Experte associée, The Shift Project)

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)

Julia MEYER (Chef de projet Numérique, ADEME)

Florian MILLET (Ingénieur radio, Davidson Consulting)

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

Relectures et apports de revues critiques

Louis COLSON (Chargé de mission économiste, Bouygues Télécom)

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.

Contributions aux travaux « réseaux satellites »

Le groupe de travail « Réseaux satellites »

David ALLIOUX (Consultant Climat, BL évolution | Membre Aéro Décarbo)

Sylvain BAUDOIN (Membre du Groupe expert, The Shift Project)

Ingrid BUQUICCHIO (Experte associée, The Shift Project)

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)

Pierre LACHEVRE (Membre Aéro Décarbo)

Eliott MARCEAU (Etudiant Isae-Supaero | Membre Aéro Décarbo)

Loïs MIRAUX (Ingénieur-chercheur durabilité des activités spatiales | Indépendant | Membre Aéro Décarbo)

Relectures et apports de revues critiques

Sonia CAZALENS (Spécialiste en télécommunications spatiales, CNES)

Julien DOCHE (Ingénieur aérospatial | Membre Aéro Décarbo)

Olivier DEL BUCCHIA (Fondateur Aéro Décarbo)

Sandrine LAFONT (Experte télécoms par satellite, CNES)

Timon VICAT-BLANC (Membre Aéro Décarbo)

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 mécènes

Un grand merci aux mécènes engagés à nos côtés en faveur de la sobriété numérique, qui rendent possible la publication de ce travail :

Partenaires techniques

Les travaux présentés dans ce rapport ont également été accompagnés par d'autres partenaires, dont l'apport d'expertise et les contributions techniques ont permis de réaliser ces travaux :

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.

Table des matières

À propos du think tank The Shift Project **3**

Contributions aux travaux « réseaux mobiles » **4**

Le groupe de travail « Réseaux mobiles » 4

Relectures et apports de revues critiques 4

Contributions aux travaux « réseaux satellites » **5**

Le groupe de travail « Réseaux satellites » 5

Relectures et apports de revues critiques 5

Partenaires mécènes **6**

Partenaires techniques **7**

Table des matières **8**

Table des figures **10**

Table des tableaux **11**

INTRODUCTION **12**

Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie 12

Une trajectoire insoutenable à infléchir 13

Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des réseaux 14

RESEAUX MOBILES : DIMENSIONNEMENTS POSSIBLES ET TRAJECTOIRES D'EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE **17**

Scénarios de spécification et déploiement des réseaux : des choix-clés qui déterminent le dimensionnement des réseaux futurs **17**

Description de l'outil de modélisation : périmètre, méthodologie, structure et applications possibles **22**

Structure et méthode générales 22

Description du modèle 25

Limites et applications possibles du modèle 32

Des choix de déploiements aux impacts de la prochaine décennie **34**

Le scénario « Cahier des charges » : contrainte réglementaires et tendances des usages 34

Effet d'offre, effet d'usage : quels liens entre trafic, impact et déploiement de l'infrastructure réseau ? 36

L'inévitable triptyque d'un numérique décarboné : éco-conception, sobriété et vision systémique 42

Les scénarios « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété » 42

L'approche en « backcasting », outil de construction d'un numérique sobre 45

RESEAUX SATELLITAIRES : TENDANCES MONDIALES ET COUTS ENVIRONNEMENTAUX DE NOS CHOIX DE SERVICES 47

Tendances mondiales et dynamiques insoutenables 47

Constellations en orbites basses : une dynamique inédite pour le secteur spatial, construite autour des services de connectivité 47

Les effets hors-CO_2 : une forte incertitude à intégrer sur l'impact des segments lanceur et satellite 51

Constellations en orbites basses pour l'accès à internet : prévisions du secteur pour 2020-2050 54

Connectivité satellite très haut débit : une nouvelle infrastructure pour le numérique, mais aux logiques et impacts inédits 56

Les services rendus de télécommunications par satellite : panorama et coûts environnementaux de nos choix de services 57

Panorama des réseaux de télécommunications satellitaires 57

Latence, couverture, capacité : coût environnemental de nos choix de services 60

Conditions de pertinence des satellites pour l'accès à internet très haut débit 62

Faire des infrastructures satellitaires une brique pertinente d'un système numérique sobre 64

RENDRE LES INFRASTRUCTURES RESEAUX COMPATIBLES AVEC LA DOUBLE CONTRAINTE CARBONE 65

Infrastructures réseaux : quels risques, quelle résilience ? 65

Quels leviers pour mener nos réseaux à un futur sobre et résilient ? 66

CONCLUSION : LES RESEAUX, UN POINT DE PIVOT VERS UN NUMERIQUE SOBRE ? . 72

Les réseaux, point de pivot vers la sobriété et la résilience 72

Planifier la décarbonation du système numérique 73

Permettre les conditions d'une discussions sociétale informée 74

REFERENCES 75

Table des figures

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) 12

Figure 2 – Nos usages et nos réseaux sont les deux faces d'une même dynamique Source : (The Shift Project, 2021) 14

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) 17

Figure 4 – Modalités possibles de mutualisation des infrastructures réseaux mobiles Source : (Arcep, 2023d) 20

Figure 5 - Schéma fonctionnel du modèle « Réseaux mobiles » de The Shift Project et liens avec le rapport sur le mondes virtuels (The Shift Project, 2024c) Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (The Shift Project, 2024b) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 7 – Représentation graphique d'un site tri-sectorisé Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport 28

Figure 8 - Stratégie de déploiement capacitaire Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport 30

Figure 9 – Consommation d'électricité annuelle en phase d'opération (à gauche) et émissions carbones annualisées associées aux phases de production et d'opération en approche « stock » et « flux » (à droite), dans le scénario « Cahier des charges » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (modèle : (The Shift Project, 2024b)) 35

Figure 10 – Scénarios d'usages : évolutions de la consommation de données sur le territoire français métropolitain selon les scénarios Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024)) 37

Figure 11 - Nombre de stations de base présentes au total sur tout le territoire national (courbe bleue) et par couple « technologie – bande de fréquence » (diagrammes barres), dans le scénario « Cahier des charges » (en haut), et pour le scénario d'usage alternatif « Usages : exponentiel » (en bas) Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (modèle : (The Shift Project, 2024b)) 38

Figure 12 – Consommations électrique annuelles des infrastructures mobiles (4G, 5G, 6G) dans le cadre les scénarios « Cahier des charge » et scénario « Usages : exponentiel » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024)) 40

Figure 13 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : exponentiel » et « Méta-métavers » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024)) 41

Figure 14 – Comparaison des consommations électrique annuelles du réseau mobile, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : croissance maîtrisée », « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024)) 43

Figure 15 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : croissance

maîtrisée », « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024)) 44

Figure 16 – Projection à 2025 de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales, approche forecasting Source : (The Shift Project, 2021) 45

Figure 17 - Evolution de la masse de charge utile placée en orbite 2010-2022 Sources : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport à partir de UCS (UCS, 2023) et Discos (ESA, 2024a) 48

Figure 18 - Aperçu global du périmètre étudié et de l'architecture pour l'accès à internet très haut-débit : solution en orbite basse (en haut) et solution géostationnaire (en bas) Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 19 - Evolution de la masse de charge utile placée en orbite : période 2010-2023 issue de la base de données DISCOS (ESA, 2024a) ; projection 2024-2050 issue du modèle (Miraux L. et al., 2022) Sources : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport 55

Figure 20 - Conséquences des projets de constellations analysés sur l'évolution des lancements, de la masse lancée et des émissions des activités spatiales issue du modèle (Miraux L. et al., 2022). Echelle normalisée par rapport à 2021 sans constellation Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport 55

Figure 21– Empreinte carbone annuelle des réseaux satellitaires et décomposition par segment Source : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport 61

Figure 22 – Empreinte carbone annuelle des réseaux satellitaires Source : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport 61

Figure 23– Etat des lieux de l'utilisation de l'accès à internet par satellite Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport 62

Table des tableaux

Tableau 1 – Caractérisation des scénarios de spécifications et de déploiement des réseaux Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport 18

Tableau 2 – Description des dynamiques des scénarios de spécifications et de déploiement des réseaux Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport 21

Tableau 3 – Description des scénarios de The Shift Project, projections 2021, approche forecasting Source : (The Shift Project, 2021) 46

Tableau 4 - Synthèse de l'état de l'art des connaissances sur les impacts des lanceurs et satellites Sources : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport à partir des références indiquées dans le tableau 53

Tableau 5 - Panorama des services rendus par les infrastructures satellitaires et des empreintes matérielles associées Source : Aéro Décarbo - The Shift Project, dans le cadre de ce rapport 58

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, jouent 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 environnementale. 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 de fabrication puis livraison aux consommateurs et consommatrices nécessitent des ressources biotiques et abiotiques conséquentes.

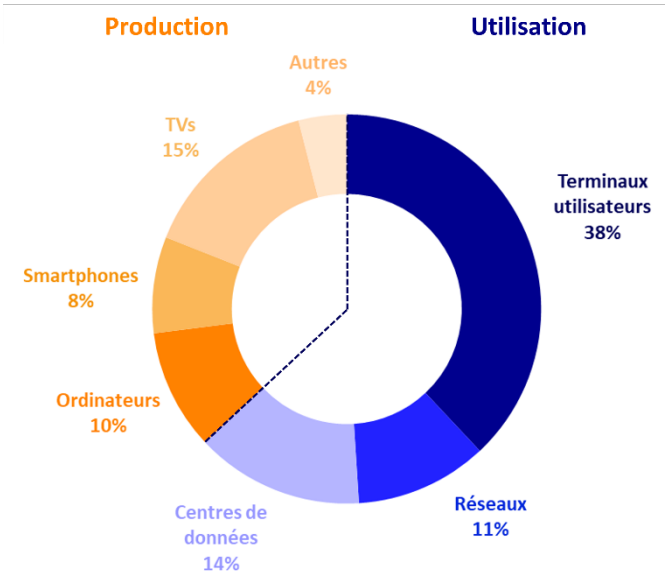


Figure 1 – Distribution de l'empreinte carbone du numérique mondial en 2019, par poste pour les phases de production (40 %) et d'utilisation (60 %)
Source : (The Shift Project, 2021)

Chaque service numérique s'appuie sur des infrastructures physiques dont la résilience et la pertinence vis-à-vis de la **double contrainte carbone (réduire les émissions carbonées de nos activités, s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles)** doivent être interrogées. Le numérique est un catalyseur : là où il est déployé, il permet d'optimiser, accélérer, fluidifier, paralléliser… Le déployer sans stratégie (ou plutôt, sans stratégie conçue à l'aune de cette double contrainte) mène donc à l'accélération de toutes les dynamiques, y compris celles les plus éloignées de nos objectifs de résilience. En faire un véritable outil de réinvention de nos activités pour les rendre compatibles avec les contraintes planétaires réclame une compréhension systémique des impacts du numérique et une stratégie adaptée.

Une trajectoire insoutenable à infléchir

Le numérique représente déjà près de 4 % des émissions mondiales (The Shift Project, 2021), soit du même ordre que l'intégralité des véhicules utilitaires lourds dans le monde (IEA, 2021). A l'échelle française, le numérique représente 2,5 % de l'empreinte carbone du pays (ADEME & Arcep, 2023).

Sa particularité tient aux 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 techniques et opérationnelles 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, 2023b). Ce constat continue de se vérifier et s'est illustré au cours des cinq dernières années, qui devaient pourtant selon certains études 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 en 2022 environ 10 % de la consommation électrique totale (The Shift Project, 2021, 2023b). Dans un contexte d'électrification intense des usages (mobilité, bâtiment, industrie etc.), on comprend qu'il se trouve 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, 2023b).

Rendre le numérique compatible avec la double contrainte carbone consiste donc non 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, GeSI[1]) 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 % en 2030 par rapport à 2020 au niveau mondial**[2].

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**

[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] Ou dans le cadre d'engagements nationaux similaires à ceux pris par les industriels français dans le cadre des feuilles de routes de décarbonation du secteur du numérique.

objectif SBTi recalculé pour l'adapter au cas français, de - 30 % des émissions du secteur à 2030 par rapport à 2020.

La construction de notre système numérique se fait au travers d'interactions multiples entre le système technique et les usages qu'il sous-tend. L'analyse au prisme de l'énergie et du climat, avec une approche systémique, permet de comprendre que **maîtriser les impacts de nos technologies ne se fera pas sans réflexion sur les déploiements d'offres et les adoptions d'usages que nous encourageons ou non.** L'inflexion des volumes de terminaux et de données étant même la **condition sine qua non à la maîtrise de la consommation énergétique grâce aux gains d'efficacité énergétique** (The Shift Project, 2023b)**.**

Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des réseaux

Les réseaux sont une brique composante centrale 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, l'étude ADEME-Arcep évalue la consommation électrique des 4 principaux opérateurs comme affichant un taux de croissance moyen de + 6 %/an entre 2017 et 2021 (ADEME & Arcep, 2023), pour atteindre presque 4 TWh en 2021[3], dont 60 % pour le seul réseau d'accès mobile (ADEME & Arcep, 2023). Cette croissance résulte d'une baisse de la consommation des réseaux fixes, due au remplacement du réseau cuivre par le réseau fibre et de la forte augmentation de celle des réseaux mobiles due au 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 de 12 %/an et représentait déjà 1,5 fois celle des réseaux fixes en 2019 (The Shift Project, 2021).

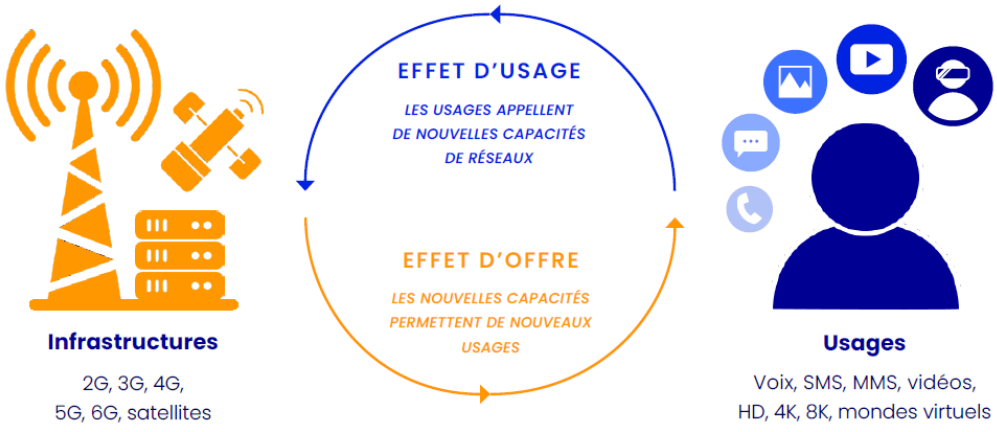


Figure 2 – Nos usages et nos réseaux sont les deux faces d'une même dynamique
Source : (The Shift Project, 2021)

[3] 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) (ADEME & Arcep, 2023).

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, rendus interdépendants par les échanges de données. 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 développer de nouveaux usages justifie le déploiement de nouvelles capacités techniques (la multiplication des contenus vidéos appelle un besoin de plus grandes capacités réseau en mobilité etc.) : c'est **l'effet d'usage** ;
- Le déploiement de nouvelles capacités techniques 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 ;**

Ce mécanisme d'évolution, dès lors qu'il se traduit en politiques publiques et stratégies économiques, s'autoentretient et s'autojustifie : 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 mobiles :**

- **Augmentation des débits et montée en fréquences**, engendrant notamment une réduction de portée du signal et donc un accroissement du nombre de sites (à couverture géographique constante) ;
- **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 choix a été fait de se concentrer sur deux grandes composantes :**

- **Les réseaux mobiles**, qui sont aujourd'hui la partie de l'infrastructure tirant la consommation électrique des réseaux et sa croissance[4] ;
- **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).

[4] Les réseaux fixes seront évidemment intégrés dans les réflexions systémiques finales, comme développé en ouverture de ce rapport.

Les simulations quantitatives sur les réseaux mobiles sont effectuées sur le périmètre français (métropole) mais s'appuient sur un **modèle paramétrable**. Sa valeur ajoutée est de mettre en évidence de façon quantitative les conséquences environnementales de choix industriels, sociétaux et politiques. Notre ambition est qu'il puisse **servir à éclairer les réflexions des acteurs publics et privés en la matière, en France et en Europe, afin de contribuer à élaborer un cahier des charges d'un numérique sobre et résilient au niveau européen**.

Ce rapport est réalisé en parallèle du rapport « Quels mondes virtuels pour quel monde réel ? » (The Shift Project, 2023a)**, qui vise à identifier les conditions de pertinence des mondes virtuels au vu des contraintes énergie-climat et des dynamiques technologiques qu'ils engendrent ou amplifient, lesquelles pourraient engendrer des augmentations structurelles des capacités réseau.**

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

Scénarios de spécification et déploiement des réseaux : 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.

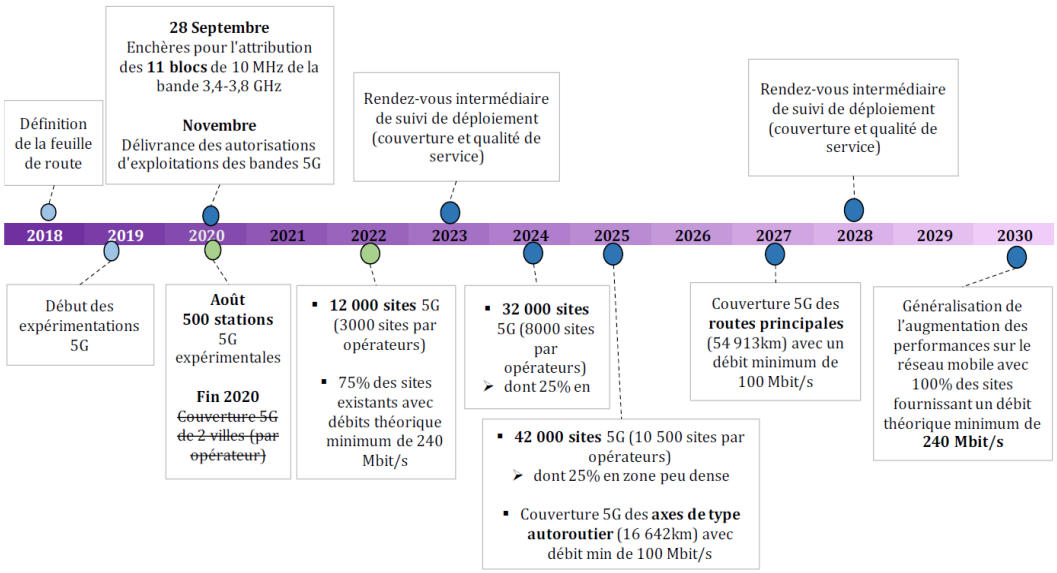


Figure 3 – Frise des principales obligations du cahier des charges de l'Arcep aux opérateurs pour la 5G
Source : image tirée de (Citizing, 2020), sur la base de (Arcep, 2019)

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	Exemple sobre
Stratégies de déploiement et enjeux sociétaux ("as usual" : cahier des chagres 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 et professionnels 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 possibles s'articulent autour de la combinaison des spécificités techniques et de déploiements 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*[5] (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)[6] ;
  - **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 (IoT[7] et IIoT[8])** : 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 (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

[5] 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).
[6] 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).
[7] IoT : Internet of Things
[8] IIoT : Industrial Internet of Things

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.

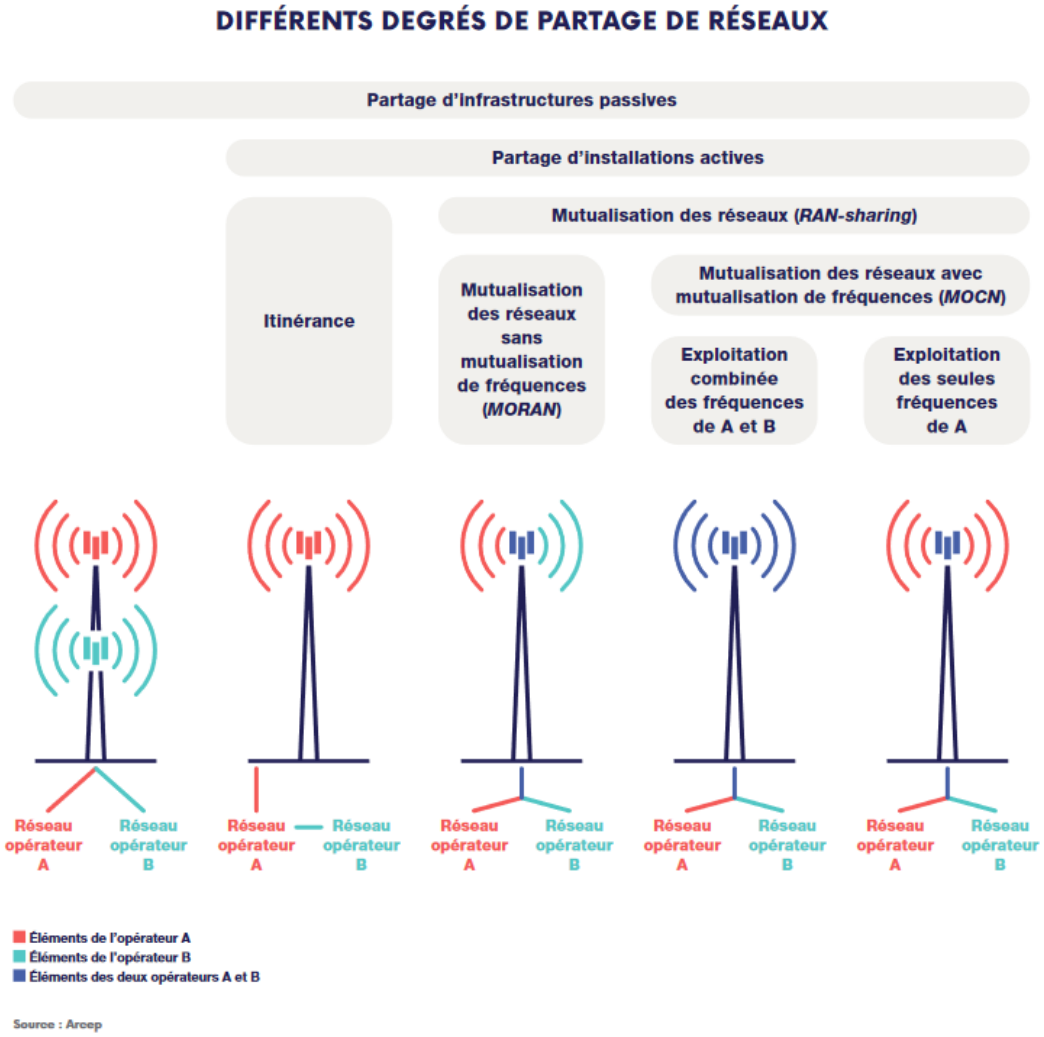


Figure 4 – Modalités possibles de mutualisation des infrastructures réseaux mobiles
Source : (Arcep, 2023d)

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**	**Exemple 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 tendancielles de développement des usages.	Absorber les dynamiques tendancielles 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 tendancielles 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

Le scénario « Exemple sobre » est ici proposé comme illustration du type de dynamiques que pourrait proposer **l'une des trajectoires compatibles avec la sobriété numérique et les contraintes physiques.** Les enjeux d'un scénario « Eco-conception et sobriété » et des recommandations permettant de le déployer font partie des aboutissements du travail mené dans le cadre de ce rapport (voir les parties « Les scénarios « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété » » et « Quels leviers pour mener nos réseaux à un futur sobre et résilient ? »).

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 réseaux[9], vise à décrire les interactions entre (Figure 5) :

- 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, 2024c) 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.

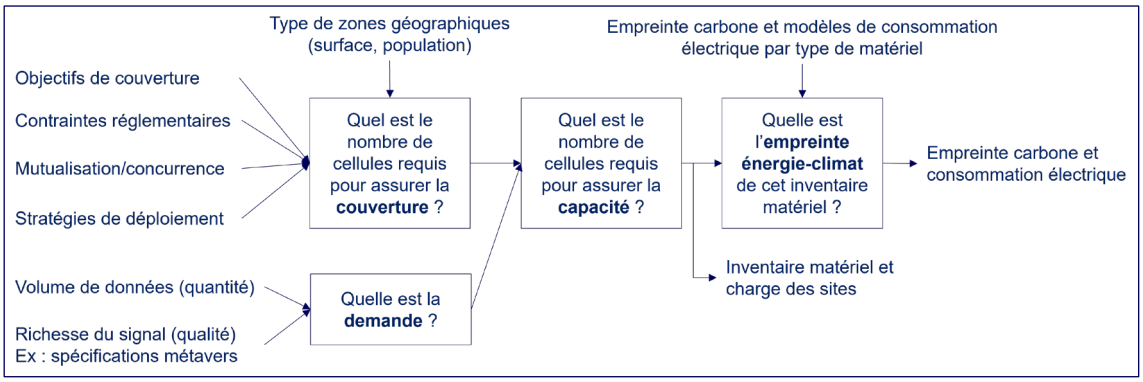


Figure 5 - Schéma fonctionnel du modèle « Réseaux mobiles » de The Shift Project et liens avec le rapport sur le mondes virtuels (The Shift Project, 2024c)
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (The Shift Project, 2024b)

[9] Détails sur le choix du périmètre technologique dans la partie « Pourquoi travailler sur l'empreinte énergie-climat des réseaux », page 6 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

L'analyse prospective des dynamiques d'impact des infrastructures réseaux peut s'appuyer sur deux méthodes de modélisation différentes : « tendancielle » ou « conséquentielle »[10]. Chacune d'elles est adaptée à l'éclairage de questions différentes.

Méthode tendancielle

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 méthodologie attributionnelle (Schaubroeck et al., 2021) pour construire des indicateurs, ainsi qu'une vision linéarisée du futur :

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

- Les évolutions 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. **C'est l'approche utilisée dans les modélisations des rapports de The Shift Project jusqu'alors, dont la dernière mise à jour à date de nos scénarios prospectifs (The Shift Project, 2021).**

[10] Cette réflexion s'appuie sur les logiques développées dans les travaux menés sur les analyses de cycle de vie attributionnelles et conséquentielle (Schaubroeck et al., 2021), mais en généralise certains des concepts.

Derrière cette linéarisation se cache la réalité du déploiement des infrastructures, davantage prise en compte par la méthode de modélisation conséquentielle.

Méthode par modélisation conséquentielle

En Analyse de cycle de vie (ACV), l'ACV conséquentielle vise à caractériser les impacts environnementaux de la consommation ou production d'une ou plusieurs unités supplémentaires (Schaubroeck et al., 2021). Nous généralisons ici ce concept en une méthode visant à décrire les effets de choix stratégiques (couverture, spécifications techniques etc.) sur les infrastructures (nombre de stations de base, 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; Malmodin J. 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 des 90 % de leur impact carbone total mondial dus à leur phase d'opération et à leur consommation électrique (The Shift Project, 2021).

Cette part fixe de la consommation électrique des réseaux, et donc des émissions carbonées qui en découlent, est prépondérante dans la consommation totale des infrastructures (Bou Rouphael, R. 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. Pour l'infrastructure réseau fixe, cette part variable ne représente que quelques pourcents, contre environ 20 à 30 % pour une station 4G[11]. Dans les deux cas, cette part est amenée à devenir plus importante dans le futur, notamment via la mise en place de mécanismes de veille plus efficaces.

Dans la méthode tendancielle, appuyée sur une logique 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 par modélisation 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.

[11] (Malmodin J. et al., 2023) reporte environ 20 % pour une station 4G chargée à 30 % en moyenne. Une étude menée par Orange Innovation reporte 30 % de part variable pour une station 4G typique. Cette même étude évalue cette part à 10-20 % sur l'ensemble de ses sites mobiles en France en 2021 (Bou Rouphael, R. et al., 2023).

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 entrée de la partie « amont » de notre modèle actuel (Figure 5), qui adopte une approche conséquentielle.**

Description du modèle

La description détaillée du modèle et les valeurs prises pour les différents paramètres sont accessibles en annexe, « Annexe – Description détaillée du modèle ».

Le cas d'étude français et la structure du modèle

L'outil est construit sur la base du cas d'étude français, mais **de manière à pouvoir être repris et paramétré afin de pouvoir être appliqué à différentes zones et contextes**. C'est dans cette optique que la description intégrale du modèle est accessible en annexe de ce rapport (« Annexe – Description détaillée du modèle ») et que le modèle lui-même est intégralement accessible en ligne (The Shift Project, 2024b).

Afin de modéliser l'évolution des réseaux mobiles en France métropolitaine à l'horizon 2035, 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 génériques, 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 principales en sont :

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

Dans le modèle, elles sont traduites en trois types de contraintes prises en entrée du calcul :

- **Population**, qui traduit les besoins en couverture de population ;
- **Régulation**, qui traduit les déploiements territoriaux requis par le régulateur ;
- **Capacité**, qui traduit l'appel en déploiements capacitaires pour absorber les évolutions de trafic.

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.

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

La période temporelle étudiée

On étudie l'évolution des réseaux mobiles en France métropolitaine entre 2024 et 2035. L'algorithme de modélisation débute à 2012, afin de reconstruire les trajectoires historiques de déploiement depuis le début de la génération 4G, et ainsi d'initialiser le modèle avec une infrastructure plausible composée d'équipements de maturité technologique et d'efficacité énergétique variées.

Dans le modèle, l'introduction de la **6G est prévue à partir 2030**[12] et celle des petites cellules 5G en ondes millimétriques **(« *small cells* ») à partir de 2026**[13].

Les caractéristiques du territoire

La France métropolitaine est divisée en **8 zones géographiques de densités croissantes**, qui représentent trois types de territoires : **rural, péri-urbain et urbain**[14].

Chaque zone géographique est caractérisée par une superficie, ainsi qu'une population dont l'évolution est calculée depuis les données de densité de population INSEE pour 2024, et extrapolée linéairement chaque année jusqu'à 2035 par application du taux d'accroissement annuel de la population nationale (INSEE, 2023).

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

Les technologies considérées

Notre modèle vise à documenter les choix de déploiements des 10 prochaines années. **Il prend donc uniquement en compte** les trois générations de technologies mobiles susceptibles de l'être dans les années à venir : **la 4G (LTE), la 5G (NR) et la 6G**. Les technologies 2G et 3G, vouées à l'extinction dans un avenir proche, ne sont pas considérées dans le modèle.

Les déploiements de la 4G et de la 5G peuvent avoir lieu tout au long de la période étudiée (2024-2035). Les déploiements de la 6G ne peuvent commencer qu'à partir de 2030.

La demande de trafic de données

On considère en donnée d'entrée le **volume moyen de données consommées par habitant**[15] et par mois. Ce volume est de **15 Go/mois en 2022**[16] **selon les données Arcep, et en augmentation parfaitement linéaire depuis plusieurs années**. L'évolution sera considérée comme suivant des tendances correspondant à différents scénarios à partir de 2023[17].

A partir du volume moyen mensuel, traduit en volume journalier de manière proportionnelle, est calculé **un volume « crête » qui servira au dimensionnement des infrastructures** : c'est lui qui conditionnera les déploiements capacitaires. Il est calculé à partir de la part du trafic journalier consommé pendant l'heure durant laquelle le trafic est le plus élevé de la journée, au cours de « l'heure chargée ». Il est considéré que **9.4 % du volume total de la journée est consommé**

---

[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).
[14] Description et caractérisation statistiques détaillées accessible en annexe : « Annexe 2 – Description des zones géographiques ».
[15] 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 des suites données à ce travail, le trafic « *machine-2-machine* » pourrait être pris en compte en ajoutant un volume de trafic spécifique.
[16] Construit à partir du volume de données mobiles consommées total (Arcep, 2023g) et réparti sur le nombre d'habitants modélisés.
[17] Voir la partie « Effet d'offre, effet d'usage : quels liens entre trafic, impact et déploiement de l'infrastructure réseau ? ».

pendant l'heure chargée (Arcep, 2023b), ce qui correspond environ à un facteur 2,25 entre le trafic moyen et le trafic en « crête ».

Ce trafic annuel est réparti entre les zones géographiques proportionnellement à la population, puis entre les trois technologies considérées (4G, 5G et 6G) en fonction de la proportion de terminaux supportant chacune des technologies (taux de pénétration) et d'un *biais* traduisant le fait qu'un utilisateur moyen 5G, et à fortiori un hypothétique futur utilisateur 6G, consomme significativement plus de données qu'un utilisateur 4G.

Les contraintes de couverture

On prend en compte ici des **contraintes de couverture en termes de superficie couverte, de population couverte, du nombre de sites 5G à 3,5GHz à déployer, de couverture des axes routiers principaux, et du pourcentage de sites devant offrir un haut-débit (débit crête théorique de 240 Mb/s)**. Ces contraintes peuvent résulter d'une stratégie de l'opérateur générique[18] 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.

Pour chaque année et chaque territoire, des objectifs pour chaque technologie (4G, 5G, 6G) sont imposés : couverture d'une proportion du territoire et d'une proportion de la population par l'opérateur générique avec la technologie.

Les objectifs de couverture 5G formulés par l'Arcep (Arcep, 2023a) sont également traduits dans le modèle :

- 8000 sites 5G dans la bande 3,5 GHz déployés en 2024 ;
- 10 500 sites 5G dans la bande 3,5 GHz déployés en 2025 ;
- 25 % de ces sites en zone rurale.

Les caractéristiques du réseau : bandes de fréquences

Dans notre modèle, nous simplifions les nombreuses bandes de fréquences disponibles en 4 bandes de fréquences disponibles pour notre 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. Dans notre modèle, on ne considère uniquement pour cette bande les « *small cells* » en 5G.

Les bandes peuvent être partagées entre plusieurs technologies :

- On suppose que les bandes **« LOW », « LOWER_MID », « UPPER_MID »** peuvent faire l'objet d'un partage **entre toutes les technologies** (grâce à une réallocation des bandes, ou « *refarming* », et un partage dynamique du spectre, ou « *dynamic-spectrum-sharing* ») ;

[18] Rappelons que dans notre modèle, le trafic de données mobiles est servi par 4 opérateurs identiques, dont les dynamiques sont modélisées au travers d'un opérateur générique.

- On suppose que la bande **« UPPER_MID »** peut faire l'objet d'un partage entre les technologies **5G et 6G** (selon la même logique) ;
- On suppose que la 5G et la 6G ont leur propre bande « HIGH » qu'elles ne peuvent pas partager.

Chaque bande est associée à une largeur de bande :

- **Pour les bandes existantes**, elle est égale à la moyenne des largeurs allouées aux opérateurs français en 2023, hors bande 900 MHz n'étant pas encore disponible pour la 4G ou supérieur ;
- **Pour la bande 6 GHz**, dans le scénario de référence, l'opérateur générique se voit allouer 100 MHz ; dans un scénario plus maximaliste, l'opérateur se voit allouer 200 MHz[19] ;
- **Lorsqu'une bande est partagée entre plusieurs technologies**, chaque technologie se voit attribuée une part de la bande spectrale proportionnelle à sa part dans le trafic total dans la zone géographique considérée.

Les caractéristiques du réseau : site, station de base, cellule et secteur

Un site est le lieu géographique de déploiement d'une station de base.

Un site est composé de plusieurs secteurs (trois sur la Figure 6 en exemple), chaque secteur ayant la forme d'un hexagone régulier. 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** (soit 2,8 secteurs par site en moyenne dans le modèle).

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.

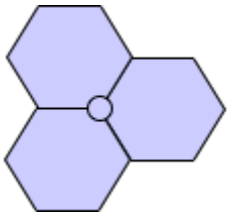


Figure 6 – Représentation graphique d'un site tri-sectorisé
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Le modèle prend en compte la possibilité de partage d'un même site par plusieurs opérateurs (on parle de mutualisation de site, de *site sharing* ou de mutualisation passive) mais ne prend pas en compte le partage de leurs bandes de fréquence (et par conséquent de leurs cellules ; on parle de mutualisation active). **On définit ainsi, pour chacune des huit zones géographiques, le nombre moyen d'opérateurs par site, pouvant évoluer au cours du temps** et dont la valeur en 2023 est indexée à partir de l'analyse de la base ANFR de fin 2023[20].

Le rayon de portée des cellules est déterminé pour chaque zone géographique à partir de la superficie de la zone et du nombre de sites ayant au moins un système 4G ou 5G de l'opérateur Orange (considéré comme représentatif). Nous avons sélectionné une année de référence récente pour les zones rurales, et plus ancienne pour les zones urbaines de manière à limiter le

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

[20] Données ouvertes accessibles : https://www.data.gouv.fr/en/datasets/donnees-sur-les-installations-radioelectriques-de-plus-de-5-watts-1

biais des zones blanches d'un côté, et la sur-densification capacitaire de l'autre. Ce rayon doit être compris comme un rayon moyen en absence de densification avec une marge d'interférence de 3 dB.

On définit également une capacité cellulaire, en Mbits/s/MHz (*efficacité spectrale*), pour chaque technologie et chaque bande, sur la base d'une analyse présentée dans le cadre du « Grand dossier 5G » de l'Arcep (Arcep, 2022b; Coupechoux, M., 2020). Les valeurs données s'appuient sur des hypothèses de configurations MIMO (c'est-à-dire en nombre d'antennes transmettrices et réceptrices) par bande, et de l'évolution de leurs proportions dans le mix technologique.

Algorithme général

Le principe général du modèle est illustré Figure 5.

Le cœur du modèle consiste à calculer pour chaque année et chaque zone géographique le nombre et le type (technologie/bande) de cellules de l'opérateur générique nécessaires pour satisfaire les contraintes en entrée. Ce calcul est réalisé de manière séquentielle en démarrant en 2012 avec une liste vide. Pour chaque année, et chaque zone, la liste de cellules de l'année précédente est mise à jour via, le cas échéant, l'ajout de nouvelles cellules pour prendre en compte les nouvelles contraintes de couverture et de régulation (cf. modèle de couverture) et l'évolution du trafic (cf. modèle capacitaire).

Cet algorithme impose un nombre de cellules ne pouvant décroître au cours du temps, traduisant l'hypothèse faite dans ce travail qu'aucun démantèlement d'équipement 4G, 5G ou 6G n'aura lieu sur la période considérée.

A partir de cette liste de cellules, nous pouvons en déduire le nombre total de stations de bases et de sites, ainsi que les besoins en énergie électrique et en nouveaux équipements (cf. modèle environnemental).

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 des contraintes imposées 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 (population et superficie), les rayons de cellules dans la bande « LOW » et les caractéristiques des zones géographiques (population et superficie) ;
- Pour la bande « UPPER_MID », l'algorithme prend en compte les contraintes de régulation en termes de sites 5G à déployer ;
- L'algorithme prend en compte les contraintes de régulation en termes de pourcentage de sites devant offrir un débit crête théorique d'au moins 240 Mb/s. Ce besoin est traduit en termes de pourcentage de sites devant offrir la bande « LOWER_MID » ou supérieur ;
- L'algorithme prend en entrée le kilométrage d'axes autoroutiers et d'axes routiers principaux qui doivent être couvert avec un débit crête théorique d'au moins 100 Mb/s, ainsi que d'une latence inférieure à 10 ms pour les autoroutes. Ces besoins sont assurés par le

déploiement de sites bi-sectorisés supplémentaires en 5G « UPPER_MID » ou supérieur pour les autoroutes, et 4G « LOWER_MID » ou supérieur pour les autres axes.

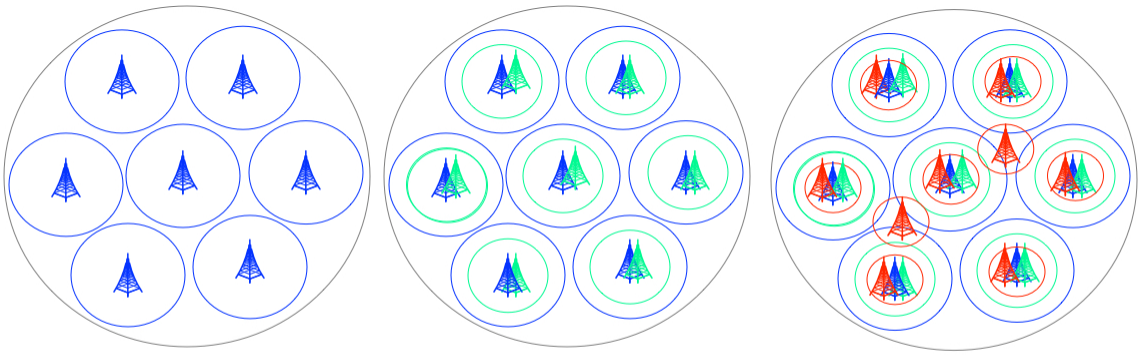
- Le modèle fournit en sortie le nombre nécessaires de cellules dans les bandes « LOW », « LOWER_MID » et « UPPER_MID » pour chacune des technologies et chacune des zones, qui permet de respecter les contraintes de couverture en population et superficie, et la contrainte de régulation.

Un traitement spécifique est appliqué pour la bande « HIGH ». On fait en effet l'hypothèse que ces fréquences ne seront déployées que sur de petites cellules placées dans des zones urbaines très denses (par exemple dans des gares, aéroports, sites touristiques ou centres commerciaux). Ces petites cellules n'ont pas pour but d'assurer la couverture du service, ni de décharger le réseau de macro-cellules. Elles sont plutôt destinées à assurer une expérience de très haut débit à l'utilisateur, de manière très localisée dans un environnement extérieur (*outdoor*) ou à l'intérieur des bâtiments (*indoor*). Le nombre de ces petites cellules est calculé en utilisant un ratio moyen par rapport au nombre de macro-cellules dans la zone urbaine dense du modèle.

Selon les scénarios, on considère un ratio variant de 0 (pas de déploiement) à 1 (toutes les macro-cellules n'ont pas vocation à être enrichie de micro-cellules) en 2035 avec une croissance linéaire à partir de l'introduction des ondes millimétriques.

Le modèle de capacité

Le modèle de capacité consiste à ajouter des cellules pour satisfaire 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 (Figure 7).



1- Utiliser la bande la plus basse pour satisfaire les contraintes de couverture

2- Ajouter successivement sur les mêmes sites des bandes intermédiaires pour satisfaire les demandes de trafic

3- Ajouter les bandes les plus hautes jusqu'à satisfaire les demandes de trafic si nécessaire en densifiant

Figure 7 - Stratégie de déploiement capacitaire
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

Le modèle mesure, pour chaque année, chaque zone géographique et chaque type de terminaux (4G, 5G ou 6G), l'écart entre la capacité déjà disponible, et la demande effective (trafic à l'heure chargée). Si la capacité installée est trop faible pour répondre à la demande, l'algorithme déploie des cellules complémentaires sur la zone géographique en commençant par les technologies et bandes les plus basses. En cas de densification, les nouveaux sites sont déployés par lots (de manière à renforcer la capacité uniformément sur la zone géographique en question) et directement en configuration « capacitaire », c'est-à-dire, avec toutes les bandes disponibles.

Une fois calculé le nombre de cellules dans chaque zone pour chaque technologie et chaque bande, le nombre de sites et leur configuration (c'est-à-dire l'ensemble des cellules présentes sur un site) est déterminé pour chaque zone géographique par le modèle en hébergeant au maximum les cellules à déployer sur des sites en commun.

Le modèle environnemental

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

- Antennes :
  - Les sites ayant des cellules dans les bandes « LOW » et « LOWER_MID » ont 1 antenne passive par secteur (2T2R pour la bande « LOW », 2T2R ou 4T4R pour la bande « LOWER_MID »). Ces antennes passives sont capables de transmettre et recevoir dans l'ensemble des bandes considérées quelle que soit la technologie ;
  - Les sites ayant des cellules dans les bandes « UPPER_MID » ont 1 antenne active AAU MIMO 64T64R par secteur. Ces antennes actives intègrent les amplificateurs de puissance et n'ont donc pas besoin de RRU associé. Elles sont partagées par la 5G et la 6G ;
  - Les sites ayant des cellules dans la bande « HIGH » ont 1 antenne active AAU MIMO 64T64R ;
- RRU (Remote radio unit) :
  - Les sites ayant des cellules dans la bande « LOW » ont 1 RRU dual-bande 2T2R par secteur ;
  - Les sites ayant des cellules dans la bande « LOWER_MID » ont 1 RRU tri-bande 4T4R par secteur ;
- BBU (Baseband unit) :
  - Les sites ayant des cellules dans les bandes « LOW » et « LOWER_MID » ont 1 BBU ;
  - Les sites ayant des cellules dans la bande « UPPER_MID » ont 1 BBU ;
  - Les sites ayant des cellules dans la bande « HIGH » ont 1 BBU ;
- **Système de transmission vers le réseau cœur (*backhaul*) :** chaque site est équipé d'un routeur. 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 1 unité de réseau optique (Optical Network Unit). Dans le second cas, le site possède 1 carte de gestion de la transmission FH ainsi que 1 antenne FH. Par soucis de simplicité et de manque de données, dans nos simulations 100% des sites sont raccordés via la première option ;
- **Alimentation électrique :** chaque site possède 1 bloc d'alimentation électrique et 1 convertisseur AC/DC ;
- **Chaque site possède 1 antenne GPS** pour la synchronisation, mais qui n'est pas modélisé ici dans nos travaux.

- **Chaque site possède 1 support,** potentiellement partagé entre plusieurs opérateurs, et dont la nature et la taille dépendent de la zone (support sur des immeubles, pylônes etc.).

Sur la base de ces règles, de la durée de vie de chacun des équipements[21], et du nombre de cellules et de sites en sortie du modèle capacitaire, le modèle environnemental maintient à jour un inventaire par année et par zone des équipements avec leur âge respectifs. Cet inventaire est ensuite utilisé pour calculer :

- L'empreinte carbone embarquée des équipements due à leur phase de production, sur la base de leurs analyses de cycle de vie respectives ;
- La consommation d'électricité de l'infrastructure en phase d'opération sur la base de la modélisation des profils de consommation des équipements ;
- L'empreinte carbone totale de la phase d'opération, obtenue par application de facteurs d'émissions de la production d'électricité en France, projetés entre 2024 et 2035 dans un scénario de transformation du mix électrique national vers la décarbonation[22].

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

Les calculs d'empreinte carbone (embarquée, totale et facteurs d'émissions de la production d'électricité) sont effectués selon une approche empreinte. Ils sont calculés via deux approches complémentaires :

- **L'approche basée « stock »,** dans laquelle les émissions embarquées des équipements sont amorties sur leur durée de vie ;
- **L'approche basée « flux »,** dans laquelle les impacts des nouveaux équipements (renouvellement des vieux équipements et nouveaux déploiements) sont intégralement imputés à l'année du déploiement.

Limites et applications possibles du modèle

L'outil de modélisation construit dans le cadre de ce travail permet d'appréhender les conséquences des choix de déploiements et de leurs motivations (couverture en population, en superficie, contraintes réglementaires, besoins capacitaires) sur l'empreinte carbone-énergie de l'infrastructure réseau mobile, **selon une approche par modélisation conséquentielle.**

Le périmètre et le cadre de pertinence de ce modèle doivent être bien compris, afin de correctement éclairer les réflexions et choix stratégiques :

- Le périmètre du modèle ne concerne que le réseau d'accès mobile. L'utiliser pour se construire une vision panoramique du numérique ne peut faire l'économie de son intégration dans une vision systémique plus large intégrant les autres briques du réseau (réseau cœur, réseau fixe, réseau satellitaire) et les deux autres tiers du système numérique (terminaux, serveurs/centres de données) ;

[21] Le détail sur les durées de vie pour chaque équipement es accessible au sein du modèle environnemental construit dans le cadre de ce rapport (The Shift Project, 2024b, Modèle environnemental).
[22] Les facteurs d'émissions utilisés sont issus des modélisations réalisées par l'Arcep sur les réseaux mobiles 4G et 5G (Arcep, 2022a).

- Un certain nombre de postes sont ignorés faute d'hypothèses suffisamment fiables, en particulier les émissions liées à l'installation et la maintenance ;
- Le périmètre géographique choisi pour sa construction et les résultats présentés dans ce rapport est français, mais sa conception a été pensée de manière à pouvoir être repris et adapté à un autre contexte géographique ;
- La plage temporelle considérée va jusqu'à 2035. Cet horizon temporel permet de projeter différents scénarios de déploiement de nouvelles technologies, tout en restant suffisamment proche pour avoir une vision déjà pertinente sur les générations étant susceptibles d'être déployées d'ici-là (intégrant bien entendu une incertitude forte sur les spécifications qu'admettra effectivement la 6G) ;
- Seules les générations susceptibles d'être déployées d'ici 2035 sont considérées. Les générations 2G et 3G, dont le décommissionnement est prévu dans les années qui viennent, ne sont ainsi pas intégrées au modèle ;
- Le modèle ne permet pas une réduction du nombre de cellules, ceci afin de traduire l'hypothèse d'une absence de démantèlement d'équipements 4G, 5G ou 6G entre 2024 et 2035. Ainsi, tout équipement déployé dans le modèle continuera d'être alimenté et remplacé lorsqu'il atteint sa durée de vie maximale, même si le trafic qu'il gère devenait nul (auquel cas sa consommation variable deviendrait également nulle, mais son impact embarqué et sa consommation fixe continueraient d'être comptabilisés dans l'empreinte totale). La modélisation est initialisée pour atteindre un niveau cohérent avec la situation actuelle du déploiement sur les différentes technologies à son instant de modélisation correspondant à 2024 ;
- Les remplacements d'équipements en fin de vie sont uniquement comptabilisés au travers de leurs impacts dans le modèle environnemental. Le nombre d'équipements déployés calculés par les modèles de couverture et de capacité comptabilisent uniquement les nouvelles installations ;
- La mutualisation passive (partage de sites entre opérateurs) est prise en compte dans le modèle, contrairement à la mutualisation active (partage de fréquences entre opérateurs), dont l'analyse de l'effet sur les impacts de l'infrastructure ne pourra être réalisée grâce à ce modèle dans sa version actuelle ;
- Certains effets et dynamiques (comme ceux de la mutualisation passive) n'apparaissent potentiellement pas dans le modèle, notamment du fait que celui-ci s'appuie sur la généralisation des choix d'un opérateur unique, qui optimise sa stratégie de déploiement et le dimensionnement du réseau par rapport à des prévisions d'évolution des contraintes (couverture, capacité) dont la visibilité est supérieure à la réalité et le degré de complexité inférieure ;
- Les scénarios d'évolution de trafic (en Go/mois/pers.) sont construits en moyenne pour la population française, afin de reconstruire une variable tendancielle adaptée à notre modèle. L'hypothèse sous-jacente en est que l'évolution du nombre de cartes SIM est indexée sur l'évolution de la population.

Ce modèle permet de produire des analyses en « stock » et en « flux », qui permettent chacune d'éclairer des réflexions et choix stratégiques différents :

- **La vision « stock » permet de comprendre sur quelle trajectoire nous placent les choix de déploiements.** Les impacts de production étant annualisés, cette approche

permet de faire le lien avec une approche en tendance[23], qui traduit l'amortissement carbone à prendre en charge une fois les déploiements actés. Ce que cette vision permet, c'est de comprendre les dépendances de la trajectoire carbone-énergie de l'infrastructure aux directions prises aux moments-clés des choix de déploiement ;

- **La vision « flux » permet de caractériser les dynamiques de déploiement dans leur réalité physique :** les émissions comptabilisées pour une année sont celles réellement émises lors des déploiements ayant eu lieu sur cette plage temporelle. Cette approche permet ainsi de visualiser plus directement les enjeux de la transformation du réseau suivant la trajectoire choisie : un impact carbone embarqué important pendant quelques années de déploiement intense de nouveaux équipements indique par exemple une période-clé, qui alimentera à la fois un amortissement carbone à prendre en charge pour les prochaines années, mais également une période d'intense importation d'équipements et d'émissions associées. En outre, cette approche par flux est celle qui est adoptée par les opérateurs ayant entamé ce travail d'estimation de leur empreinte carbone annuelle.

Des choix de déploiements aux impacts de la prochaine décennie

Le scénario « Cahier des charges » : contrainte réglementaires et tendances des usages

Le scénario « Cahier des charges » correspond aux dynamiques de déploiement résultant de la combinaison des contraintes réglementaires actuelles (4G, 5G) et de l'évolution tendancielle des volumes de données consommés. Il intègre :

- Les objectifs de couverture en bandes basses ;
- Les contraintes réglementaires[24] :
    - De déploiement en couverture du territoire par la 5G dans la bande « UPPER_MID » ;
    - De couverture des axes routiers principaux et des autoroutes, avec un certain niveau de performance ;
    - De performance sur le territoire, avec un objectif d'une capacité de débit descendant maximum théorique de 240 Mbit/s sur 100 % des sites du territoire en 2030 ;
- Le déploiement de la technologie 6G à partir de 2030 ;
- Un taux de mutualisation qui reste équivalent à celui de 2024 ;
- Une évolution des usages qui correspond à l'augmentation prévisionnelle d'ADL (Arthur D Little, 2023), soit 98 Go/mois/pers. en 2030[25], et prolongée selon une logique linéaire de

[23] Bien que sa logique reste bien conséquentielle dans la traduction des liens entre évolutions du trafic et déploiements.
[24] Détails dans la partie « Description du modèle ».
[25] Cette projection a été reconstruite depuis les données ADL, reportée en moyenne sur la population dans son intégralité, afin de reconstruire une variable tendancielle adaptée à notre modèle. L'hypothèse sous-jacente est que l'évolution du nombre de cartes SIM est indexée sur l'évolution de la population.

2030 à 2035 (dit scénario « Usages : référence », voir la partie « Effet d'offre, effet d'usage : quels liens entre trafic, impact et déploiement de l'infrastructure réseau ? », p. 36).

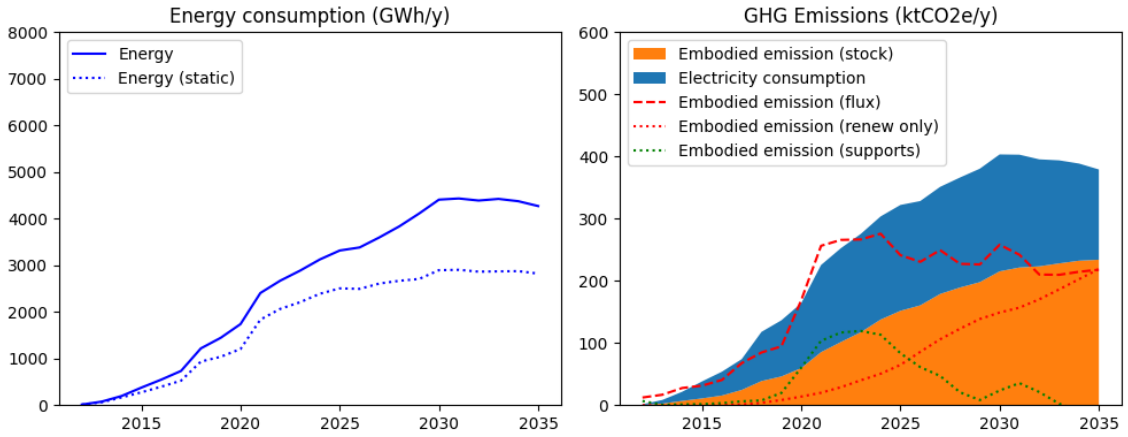


Figure 8 – Consommation d'électricité annuelle en phase d'opération (à gauche) et émissions carbones annualisées associées aux phases de production et d'opération en approche « stock » et « flux » (à droite), dans le scénario « Cahier des charges »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (modèle : (The Shift Project, 2024b))

Entre 2020 et 2025, l'impact carbone d'un déploiement massif d'équipements réseaux (4G et 5G) et spécifiquement de nouveaux sites (courbe « support » dans le graphique) apparaît dans la vision en « flux » (Figure 8), qui comptabilise le carbone effectivement émis année par année (contrairement à la méthode « stock », qui répartit les émissions de production sur la durée de vie des équipements). Les émissions continues (courbe « flux » dans le graphique) jusqu'en 2030 sont le reflet des contraintes de régulation post-2025 (routes, autoroutes, 240 Mb/s) ; là où la bosse de 2030 est le reflet de l'introduction de la 6G. **Cette montée en puissance de l'infrastructure résulte des contraintes réglementaires. Les besoins capacitaires viennent, dans un deuxième temps, amplifier la dynamique créée.**

Une dynamique cyclique est ici mise en évidence : les déploiements sont justifiés par des contraintes et choix qui visent à **adapter les infrastructures à l'évolution prévue des usages numériques** (besoins de couverture de plus en plus incontournable par nécessité d'accès aux services numérisés, besoins de nouvelles technologies en vue du déploiement prévu de nouveaux services et de contenus pour les entreprises et le grand public etc.). L'objectif est de disposer à tout instant d'un réseau capable de supporter l'usage qui en sera fait. Une fois le pallier de déploiement passé, **les nouvelles capacités du réseau permettent le déploiement des usages : ceux-là mêmes qui étaient pressentis dans les prévisions** ayant motivé le déploiement en tout premier lieu. Ces nouveaux usages, plus gourmands en données, appellent alors des déploiements capacitaires qui viennent compléter les stations de base déjà déployées.

Dans un scénario où la consommation de données augmente continuellement, les déploiements capacitaires adviendront toujours au bout d'une période donnée, alourdissant de nouveau l'empreinte carbone embarquée totale des réseaux, impossible à réduire en tant que telle. En l'absence de démantèlement de stations de base 4G, 5G ou 6G d'ici 2035, le remplacement de ces équipements au fil des ans lorsqu'ils atteignent la fin de leur durée de vie a pour effet de maintenir le poids des impacts de production annualisés (vision « stock ») dans l'empreinte embarquée du réseau, qui ne peut ainsi qu'augmenter[26].

[26] Le bilan carbone du démantèlement des sites n'a pas été étudié dans le cadre de nos travaux, et ne permet donc pas de conclure quant à l'utilité de réduction des émissions embarquées même en cas de démantèlement. Par exemple, si la

Ces dynamiques placent l'infrastructure réseaux sur une trajectoire tout à fait incompatible avec la construction d'un numérique adapté à la contrainte énergie-carbone. Alors que notre système numérique doit parvenir à réduire ses impacts pour atteindre un objectif de - 30 % à 2030, **les indicateurs d'impact des réseaux mobiles, l'une de ses composantes structurantes, accusent une hausse incontrôlée entre 2020 et 2030 :**

- **Une multiplication par 2,5 de leur impact carbone annuel ;**
- **Une augmentation de 150 % de leur consommation électrique annuelle, soit 2,5 TWh additionnels en 2030.**

Le plafonnement des impacts qui semble apparaître entre 2030 et 2035[27] (Figure 8) n'est ainsi en rien compatible avec les objectifs de réduction de l'impact carbone du système numérique. Bien qu'il puisse résulter d'une période au cours de laquelle les gains d'efficacité énergétique se manifestent sans être contrebalancés par l'inflation des volumes et du déploiement, il ne peut être qu'un phénomène passager si l'inflation des volumes de trafic est maintenue à un rythme trop soutenu. Celle-ci alimentera les déploiements capacitaires et étant liée à de nouveaux usages qui appelleront de nouvelles capacités du réseau (latence, fiabilité etc.), ce qui aura pour effet d'orienter la conception des nouvelles générations de technologies mobiles en alignement avec cette accélération.

L'arrivée d'une nouvelle technologie comme la 6G est corrélée à une accélération de la croissance des volumes de données consommés, et vient alimenter les déploiements capacitaires à partir de 2030 (Figure 8, vision « flux »). Cela vient du fait que **la 6G représente dans notre modèle une génération construite comme les précédentes, c'est-à-dire avec pour cahier des charges l'augmentation des capacités et performances du réseau mobile** (en débit, en latence, en fiabilité). **Concevoir une technologie 6G au service de la décarbonation, en faisant de la réduction de l'impact environnemental absolu des réseaux ainsi que du système numérique dans son ensemble un critère angulaire de son cahier des charges, pourrait potentiellement changer cette dynamique, observée et récurrente à chaque nouvelle génération mobile**.

Effet d'offre, effet d'usage : quels liens entre trafic, impact et déploiement de l'infrastructure réseau ?

Les choix de dimensionnement entérinent les trajectoires d'usages...

Les choix de déploiement entérinés en 2020 par les contraintes réglementaires génèrent un déploiement infrastructurel (et son coût carbone associé) **dimensionné pour supporter une trajectoire de consommation de données de 150 Go/mois/pers. en 2035**.

durée d'amortissement de l'impact du démantèlement était supérieure à 5 ans, il serait dans tous les cas impossible de réduire les émissions embarquées en « stock » dans le réseau à 2030.

[27] Malgré l'introduction d'une 6G sans contraintes réglementaires, par opposition au déploiement de la 5G initialement amorcé par ces contraintes réglementaires.

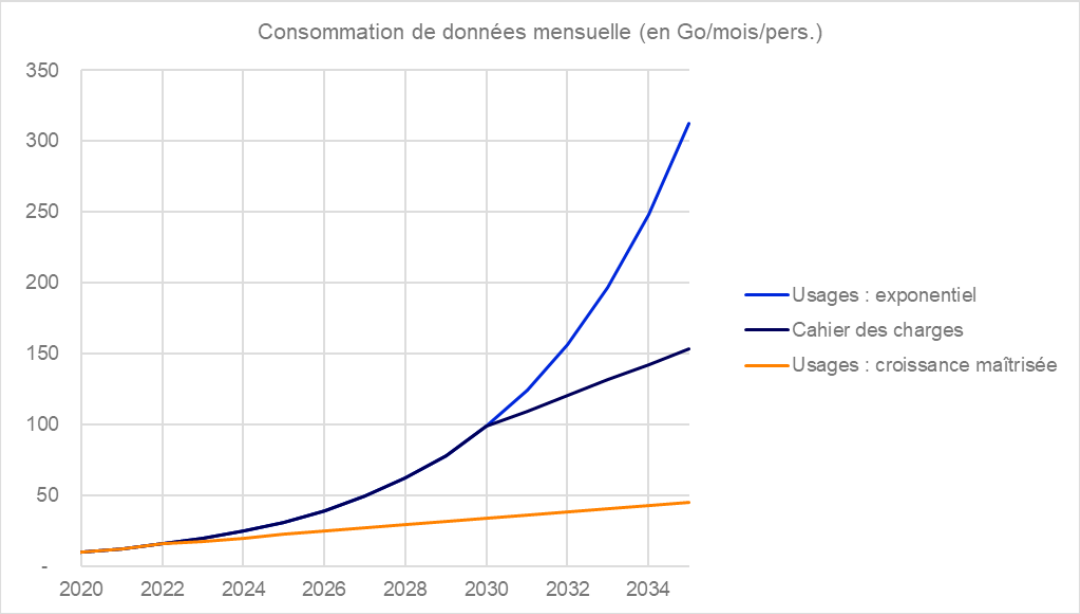


Figure 9 – Scénarios d'usages : évolutions de la consommation de données sur le territoire français métropolitain selon les scénarios
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024))

C'est la conclusion qui émerge de la comparaison de différents scénarios d'évolution des usages :

- **Le scénario « Usages : croissance maîtrisée »**, qui prolonge la tendance linéaire historiquement observée dans les données Arcep de 2017 à 2023 (Arcep, 2023g), pour mener à une consommation de données de **34 Go/mois/pers. en 2030** en restant linéaire ensuite ;

  → Ce scénario, qui mène à une consommation de données de 45 Go/mois/pers. en 2035, représente une trajectoire de constance dans la dynamique d'évolution de l'intensité des usages[28] *;*

- **Le scénario « Usages : référence »** (celui utilisé dans le scénario « Cahier des charges »), qui prévoit une consommation de données qui correspond à l'augmentation prévisionnelle d'ADL, soit **98 Go/mois/pers. en 2030**[29] (Arthur D Little, 2023), prolongé avec une tendance linéaire à 2035 ;

  → Ce scénario, qui mène à une consommation de données d'environ 150 Go/mois/pers. en 2035, représente une trajectoire prenant en compte une rupture de pente au moment de la généralisation de l'adoption de la nouvelle technologie 5G (autour de l'année 2025), mais pas de rupture en 2030, considérant que la technologie 6G et les nouveaux usages qui y sont liés débute son déploiement en gardant un niveau d'adoption limité avant 2035 ;

[28] Il implique donc qu'il n'y a pas de dynamiques de rupture dans le déploiement et l'adoption de services par rapport à la période 2017-2023.
[29] Cette projection a été reconstruite depuis les données ADL, reportée en moyenne sur la population dans son intégralité, afin de reconstruire une variable tendancielle adaptée à notre modèle. L'hypothèse sous-jacente est que l'évolution du nombre de cartes SIM est indexée sur l'évolution de la population.

- **Le scénario « Usages : exponentiel »,** qui prévoit une consommation de données atteignant **98 Go/mois/pers. en 2030** (Arthur D Little, 2023), prolongé avec une tendance exponentielle (au même rythme de + 26 %/an) à 2035 ;

  → Ce scénario, qui mène à une consommation de données d'environ 300 Go/mois/pers. en 2035, représente une trajectoire prenant en compte une évolution exponentielle des volumes, due à une rupture de dynamique (à la hausse) au moment de la généralisation de l'adoption de la nouvelle technologie 5G (autour de l'année 2025), qui s'entretient en 2030 avec l'arrivée de la 6G. Cette accélération continue des volumes consommés est le résultat du développement conjoint d'usages professionnels et grand public très intenses comme les usages immersifs, ainsi que des flux de communications IoT, IIoT et/dont M2M avec une généralisation de l'IA. La valeur moyenne donnée ici « par personne » intègre donc, de façon implicite, une part importante de trafic différent en nature du trafic généré par les usagers eux-mêmes.

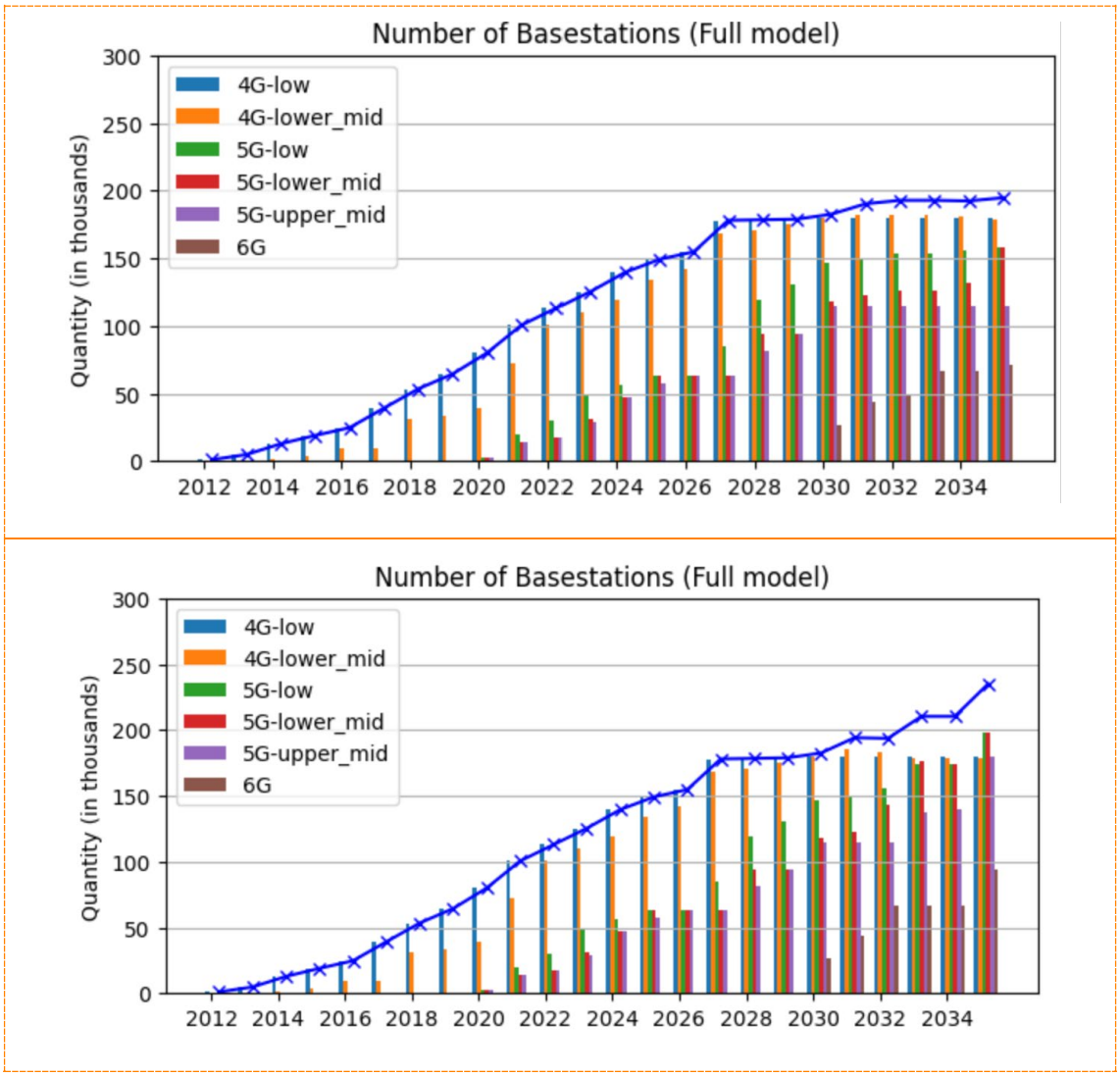


Figure 10 - Nombre de stations de base présentes au total sur tout le territoire national (courbe bleue) et par couple « technologie – bande de fréquence » (diagrammes barres), dans le scénario « Cahier des charges » (en haut), et pour le scénario d'usage alternatif « Usages : exponentiel » (en bas)
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (modèle : (The Shift Project, 2024b))

La comparaison des dynamiques de déploiement de stations de base des scénarios « Cahier des charges » (Figure 10, en haut) et pour une évolution d'usages alternative « Usages : croissance maîtrisée » (voir en annexe[30]) met en lumière l'effet cliquet qu'engendrent les choix de déploiement sur le dimensionnement du réseau : **la différence entre les deux trajectoires de trafic, pourtant conséquente, ne se traduit pas dans le nombre de stations de base déployées en 2035**.

Le nombre de stations de base dans le scénario « Usages : croissance maîtrisée » est équivalent en 2035 à celui du scénario « Cahier des charges », avec un trafic pourtant 3 fois inférieur. Il en résulte que la seule voie possible pour rentabiliser le coût des déploiements est de faire croître le trafic en introduisant de nouveaux usages monétisables.

Il est donc patent que **les choix (implicites ou explicites) de dimensionnement initiaux induisent très fortement la dynamique effective de progression des usages**.

Ceci reste vrai jusqu'à ce que la demande effective dépasse un palier haut : pour une évolution du type « Usages : exponentiel », le déploiement massif et généralisé d'usages très intenses (mondes immersifs, IoT, IIoT, IA etc.) engendre un trafic qui dépasse celui qu'est capable d'absorber l'infrastructure résultant des choix initiaux. **Les déploiements capacitaires nécessaires après 2030 mènent à un nombre de stations de base qui devient supérieur de 20 %** à celui du scénario « Cahier des charges » en seulement 3 ans (Figure 10).

La reprise des déploiements de stations de base dans le scénario « Usages : exponentiel » à partir de 2032 montre le passage d'un nouveau pallier de trafic. **La dynamique insufflée par les choix initiaux (contraintes réglementaires jusqu'à 2030) a entériné le dimensionnement d'un réseau** conçu pour un monde dans lequel la consommation de données atteint 150 [31] Go/mois/pers.[32].

[30] Disponible Figure 5, en annexe : « Annexe – Modélisation réseaux mobiles : figures et données complémentaires ».
[31] C'est-à-dire de l'ordre du niveau de consommation de données de la période 2032-2033 dans le scénario « Usages : exponentiel ».
[32] Cela se confirme par l'analyse des ratio « capacité/trafic » par technologie et zone géographique (disponible en annexe, « Annexe – Modélisation réseaux mobiles : figures et données complémentaires »), qui traduisent dans le scénario « Usages : référence » une adéquation notable « offre – demande », entre les déploiements et les niveaux de trafic.

... mais les trajectoires d'usages pilotent les choix de déploiements.

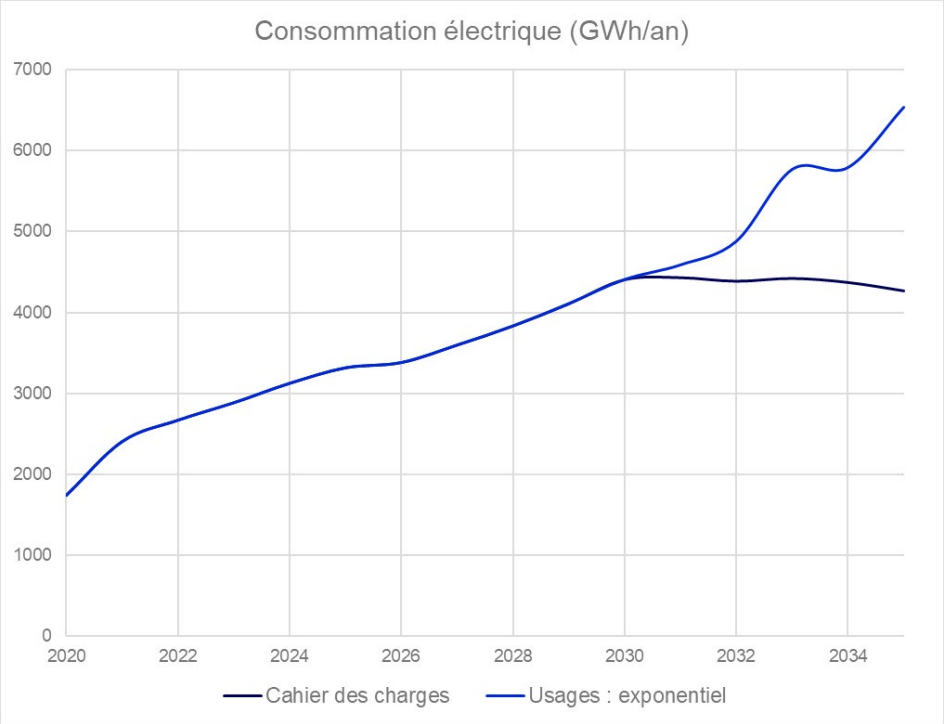


Figure 11 – Consommations électrique annuelles des infrastructures mobiles (4G, 5G, 6G) dans le cadre les scénarios « Cahier des charge » et scénario « Usages : exponentiel »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024))

Les nouveaux usages déclenchent de nouveaux besoins, et appellent de nouveaux impacts. Dans le scénario « Usages : exponentiel », l'adoption généralisée de nouveaux usages engendre ainsi **un surcoût carbone de 20 % de l'impact total du réseau mobile, et une augmentation de sa consommation électrique de plus de 2 TWh à 2035**, par rapport au scénario de référence (et de plus 4,5 TWh par rapport à 2020).

Les opérateurs construisent leurs stratégies de déploiement pour répondre aux projections (en trafic et niveaux de performance) qui sont prises comme référence par les parties prenantes du secteur. **Or, une projection des usages technologiques n'est pas une description de la réalité** : prolonger une tendance d'adoption des usages numériques n'est pas une caractérisation factuelle, mais une hypothèse et **un choix de futur technologique**. Derrière les projections sur lesquelles nous choisissons aujourd'hui de baser les choix et stratégies de déploiement, que nous concevons comme devant répondre à une « demande » que les acteurs ne peuvent que chercher à anticiper, se cachent des **choix d'orientations et de paradigmes technologiques**.

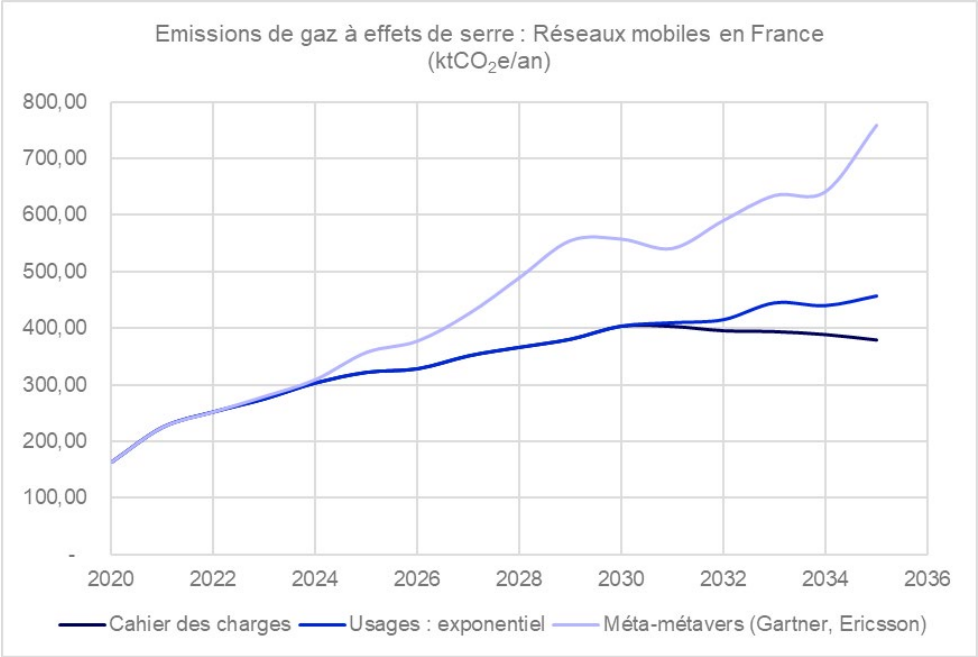


Figure 12 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : exponentiel » et « Méta-métavers » Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024))

C'est ce que détaille, en s'appuyant sur le cas des mondes virtuels et de leurs applications, notre rapport « Climat, énergie : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ? » (The Shift Project, 2024c). Le scénario « Méta-métavers »[33] représente un futur dans lequel les dynamiques de construction des usages décrites dans notre rapport sur les mondes virtuels se réalisent[34] : la projection de nouveaux usages et services par les acteurs du secteur s'appuie sur des **promesses à très large spectre** (de la *métaconférence* aux jumeaux numériques des *métavers industriels*) **devant sans doute davantage être interprétées comme un signal envoyé à l'écosystème numérique afin de structurer les orientations technologiques et les réglementations prises, dans une direction permettant l'avènement d'un métavers généralisé à terme. Le signal est pris au sérieux en France et en Europe** (Basdevant A., François C., Ronfard R., 2022; Direction Générale des Entreprises, 2022; European Commission, 2023) **avec un surcroît d'annonces, d'investissements, de créations d'entreprises et de structurations autour des technologies immersives et à l'échelle de l'Union européenne avec l'intention que la 6G permette l'avènement de ce type de mondes virtuels** (European Commission, 2023; European Parliament, Committee on the Internal Market and Consumer Protection, 2023; L'usine digitale, 2023a). On retrouve, **avec les usages des mondes virtuels**, une prochaine « marche d'escalier » des dynamiques que The Shift Project décrivait au travers des usages vidéo en 2019 (The Shift Project, 2019), et qui **placerait le système numérique sur une trajectoire d'explosion de ses impacts** (Figure 12)**.**

Cette prochaine « marche d'escalier » n'est cependant pas la suite obligée d'une dynamique inarrêtable. **Il est à notre charge de construire la trajectoire que nous souhaitons impulser pour nos réseaux.** Pour The Shift Project, ce cap devrait être orienté par la boussole de la double contrainte carbone, afin d'assurer la résilience de nos usages numériques au cours des trois prochaines décennies.

[33] Description détaillée en annexe (Figure 26) : « Annexe – Modélisation réseaux mobiles : figures et données complémentaires ».
[34] Avec un trafic d'environ 190 Go/mois/pers. en 2030 et presque 500 Go/mois/pers. en moyenne en 2035.

L’inévitable triptyque d’un numérique décarboné : éco-conception, sobriété et vision systémique

Les scénarios « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété »

Les scénarios « Eco-conception systémique » et « Eco-conception & sobriété » caractérisent les effets de la **mobilisation des leviers technologiques et de réorganisation** à notre disposition pour **endiguer l’inflation des impacts énergie-carbone de l’infrastructure réseau** :

- Le scénario « Eco-conception systémique » intègre :
    - Les objectifs de couverture en bandes basses ;
    - Les contraintes réglementaires du scénario « Cahier des charges » mais uniquement jusqu’en 2024 (voir « Le scénario « Cahier des charges » : contrainte réglementaires et tendances des usages ») ;
    - Une suspension du déploiement de la technologie 6G telle qu’imaginée aujourd’hui ;
    - Un allongement de la durée de vie des équipements réseaux ;
    - Une amélioration de l’efficacité énergétique des équipements réseaux (une réduction de la part fixe à partir de 2026 de 10 % qui pourrait être représentative de l’introduction d’un mode « veille ») ;
    - Un niveau de mutualisation passive qui reste finalement sensiblement équivalent à celui de 2024[35] ;
    - Une évolution des usages qui correspond à la mobilisation des codecs les plus efficaces sur les contenus vidéos et d’un référentiel d’éco-conception des services numériques qui permettrait de réduire de 20 % le trafic par rapport au scénario d’usages « Usages : référence ».

[35] Sauf stratégie de démantèlement, dont l’impact en termes de carbone n’est pas évalué par nos travaux, aucun gain provenant de la mutualisation passive n’apparaît dans le modèle. Certains de ces effets restent potentiellement invisible dans notre modèle, notamment du fait que celui-ci s’appuie sur la généralisation des choix d’un opérateur unique (simplifiant donc très fortement les dynamiques de répartition du marché), qui optimise sa stratégie de déploiement et le dimensionnement du réseau par rapport à des prévisions d’évolution des contraintes (couverture, capacité) dont la visibilité est supérieure à ce qu’elle est dans la réalité.

- Le scénario « Eco-conception & sobriété » intègre :
    - Les mêmes spécifications que le scénario « Eco-conception systémique » sur les caractéristiques techniques du réseau ;
    - Une évolution des usages qui correspond à une trajectoire de constance dans la dynamique d'évolution de l'intensité des usages : la consommation de données moyenne par personne continue d'augmenter entre 2024 et 2035, mais selon une dynamique linéaire, qui lui permet d'atteindre un niveau de 45 Go/mois/pers. en 2035 (pour 20 Go/mois/pers. en 2024). Cette trajectoire laisse possible le déploiement de nouveaux usages, tout en maintenant sous contrôle les impacts des infrastructures[36].

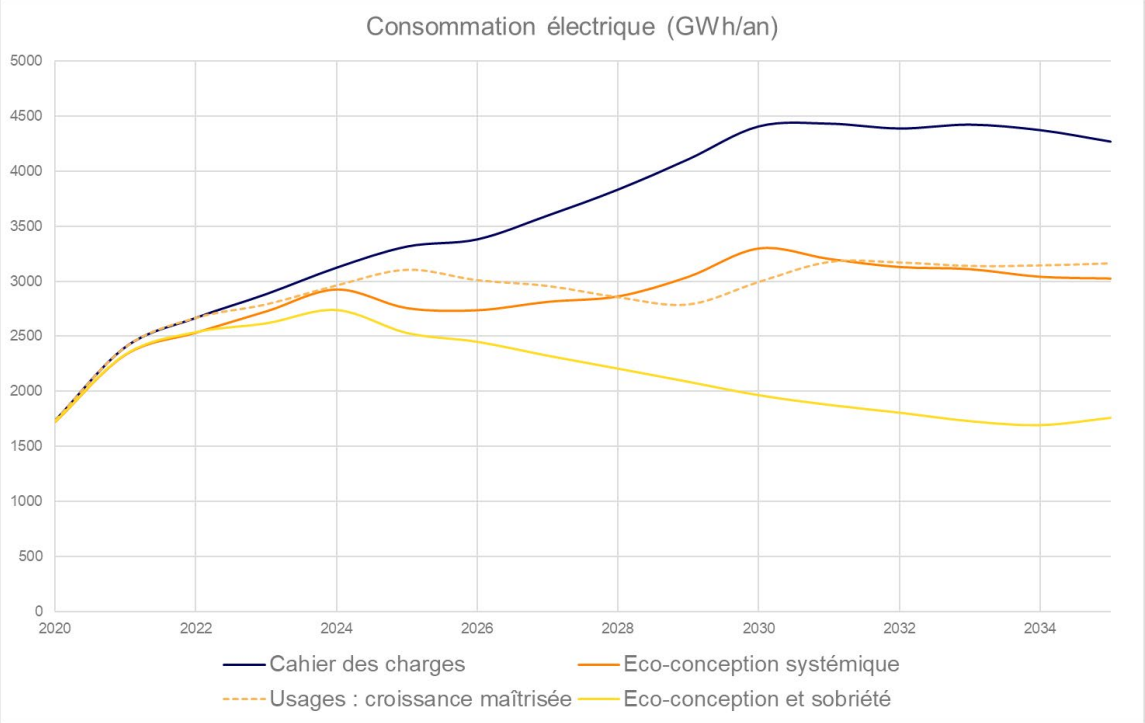


Figure 13 – Comparaison des consommations électrique annuelles du réseau mobile, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : croissance maîtrisée »[37], « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024))

L'activation des leviers d'éco-conception permet de mobiliser toutes les marges de réduction des impacts unitaires disponibles. Comme le laissaient transparaître les dynamiques identifiées dans les scénarios « Cahier des charges », l'augmentation continue des volumes de données aboutit forcément à des déploiements supplémentaires et aux sauts d'impacts associés, en plus de tirer la partie variable de la consommation électrique des réseaux vers son maximum. **Les leviers d'éco-conception, qui reposent sur l'optimisation des services, équipements et stratégies d'opérations du réseau, ne peuvent endiguer seuls les effets de la croissance des usages sur les impacts carbone-énergie des réseaux mobiles.**

[36] La modélisation d'un scénario complémentaire « Trafic stable », avec une consommation de données plafonnant au niveau de 2024 jusqu'à 2035, montre des effets très limités à la réduction de trafic en-deçà de ce seuil (voir Figure 27, dans « Annexe – Modélisation réseaux mobiles : figures et données complémentaires »).
[37] Ce scénario correspond au scénario « Cahier des charges », mais intégrant la trajectoire de trafic du scénario « Usages : croissance maîtrisée ».

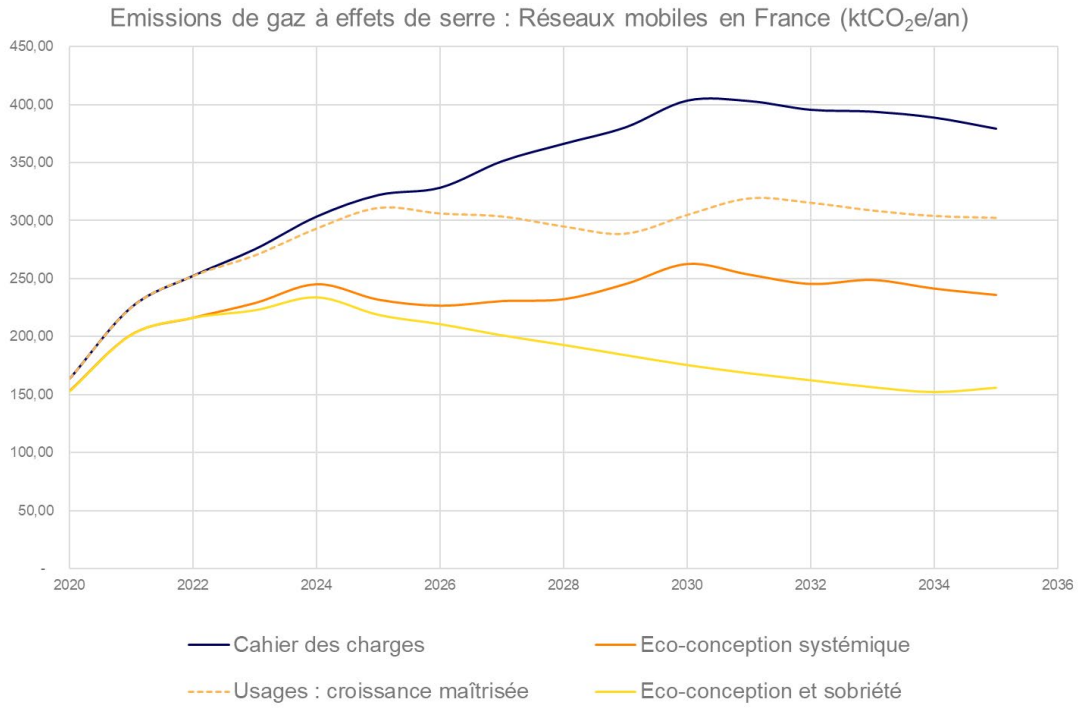


Figure 14 – Empreinte carbone totale annuelle des réseaux mobiles en France métropolitaine, entre 2020 et 2035, pour les scénarios « Cahier des charges », « Usages : croissance maîtrisée »[38], « Eco-conception systémique » et « Eco-conception et sobriété »
Source : The Shift Project, dans le cadre de ce rapport (données détaillées : (The Shift Project, 2024))

Ce n'est qu'en activant conjointement les deux familles de leviers, « éco-conception » et « sobriété », que leurs effets, qui se répondent, permettent de **placer les réseaux sur une trajectoire viable**. Sans stratégie d'endiguement du trafic de données, les efforts d'allongement des durées de vie des équipements réseau pour réduire l'empreinte embarquée seront compensés par les impacts d'un déploiement capacitaire inévitable.

De la même manière, une croissance continue des usages empêchera systématiquement de rentabiliser les efforts déployés en matière d'efficacité énergétique. **Endiguer l'inflation des usages très consommateurs en données permet à la fois de réduire drastiquement et de manière directe la part variable de la consommation électrique** des équipements réseaux (environ 30 % de la consommation totale dans nos modélisations) **et de rentabiliser les efforts réalisés en matière d'efficacité énergétique** sur la partie fixe de cette consommation (Figure 5, dans « Annexe – Modélisation réseaux mobiles : figures complémentaires »).

Mobiliser l'éco-conception et la sobriété dans la construction de nos réseaux futurs permet de contenir l'inflation des impacts des réseaux mobiles, mais pas de les placer sur une trajectoire qui leur permettrait de les réduire. L'enjeu étant de parvenir à permettre au système numérique dans son ensemble d'atteindre un objectif de réduction de 30 % de ses émissions à 2030 par rapport à 2020, **cette stratégie pour les réseaux mobiles doit être intégrée dans une vision systémique, à trois échelles : celle des infrastructures réseaux dans leur ensemble** (satellites, fixes, cœur, mobiles), **du numérique dans son ensemble**

[38] Ce scénario correspond au scénario « Cahier des charges », mais intégrant la trajectoire de trafic du scénario « Usages : croissance maîtrisée ».

(terminaux, réseaux, serveurs et centres de données) **ainsi qu'au sein des systèmes d'usages dont il est intégralement interdépendant**.

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

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 soutenu de l'amélioration de l'efficacité énergétique, rythme plus ou moins soutenu de l'augmentation des flux de données etc.).

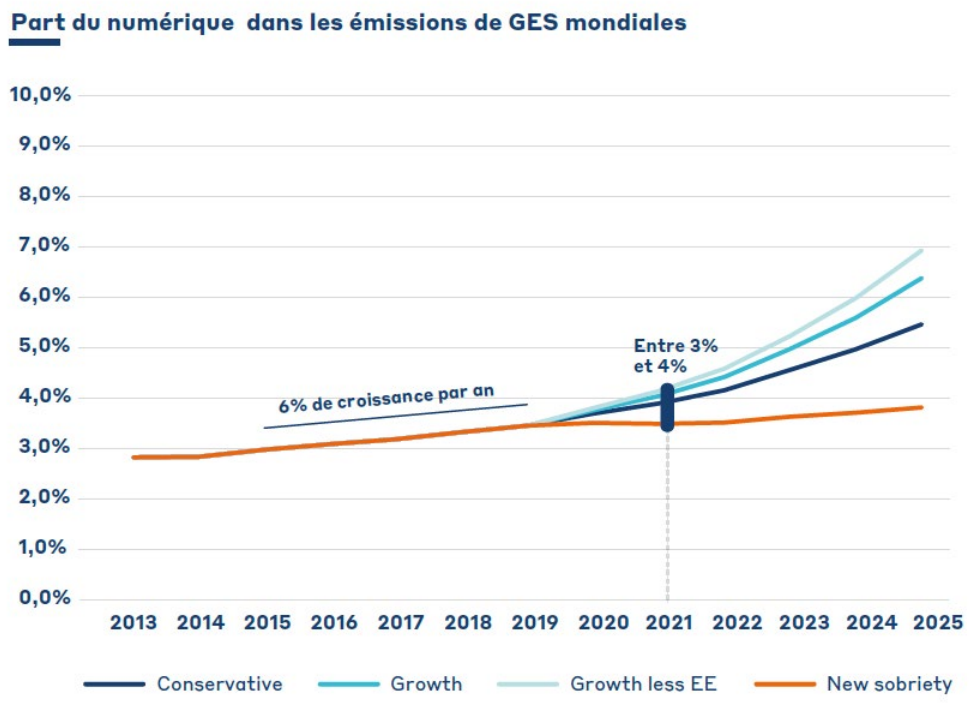


Figure 15 – Projection à 2025 de la part du numérique dans les émissions de GES mondiales, approche forecasting
Source : (The Shift Project, 2021)

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 15) ;

- **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 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'énergie **prises en compte**.

Avec la construction et l'analyse du scénario « Eco-conception & sobriété », les travaux menés dans le cadre ce rapport apportent une première conclusion essentielle : **l'objectif pour les réseaux mobiles doit être de déployer les leviers permettant la stabilisation et la maîtrise de leurs impacts carbone-énergie, afin de rendre possible la décarbonation du système numérique à l'échelle d'un objectif 2°C, - 30 % à 2030 par rapport à 2020** (The Shift Project, 2023b)**, en permettant et contribuant à l'effort d'optimisation et de réorganisation du secteur.**

L'objectif de réduction des émissions du numérique ne pouvant être traduit de manière homothétique sur ses sous-ensembles, le formuler au niveau du système dans son ensemble permettra d'éclairer les arbitrages qu'il faudra documenter et effectuer au sein et entre les trois tiers (terminaux, réseaux, centres de données). Les modélisations nous montrant que l'impact des réseaux mobiles peut être stabilisé à 2030-2035, on comprend que la réduction des impacts ne pourra venir que d'une réflexion systémique :

- **En réintégrant la vision « réseau mobile » dans une vision « réseaux » complète**, dont les trois autres briques sont les réseaux fixes, les réseaux satellitaires et le réseau cœur ;
- En réintégrant la vision « réseaux » complète dans une vision « système numérique » complète, dont les deux autres tiers sont les terminaux et les centres de données.

C'est cette démarche, systémique et quantitative, qui nous permettra de développer l'approche « backcasting » sur le système numérique dans son ensemble et de finalement dessiner les contours des chemins possibles pour le numérique et ses usages, dans un futur adapté à la double contrainte carbone.

Réseaux satellitaires : tendances mondiales et coûts environnementaux de nos choix de services

L'essor récent des constellations de satellites en orbites basses façonne une nouvelle infrastructure réseau dans l'espace. Si les technologies et les réalités opérationnelles sont évidemment différentes, les enjeux de déploiement sont de même nature que ceux des réseaux terrestres : débit, niveau de service, latence et choix de couverture (zones blanches, zones périurbaines, zones denses), pour lesquels les applications particulières des technologies spatiales induisent certaines spécificités dans les objectifs de services et d'accès (zones géographiques aux pouvoirs d'achat variés et aux enjeux de développement divers, accès à internet privé, professionnel, groupé, civil, défense, en redondance, autres types de communication etc.).

Tendances mondiales et dynamiques insoutenables

Constellations en orbites basses : une dynamique inédite pour le secteur spatial, construite autour des services de connectivité

L'essor récent des constellations en orbites basses combiné à la part historique des télécommunications dans les activités spatiales nous a conduit à étudier l'empreinte carbone des réseaux satellitaires. Entre 2010 et 2015, les missions de télécommunications et en particulier celles placées en orbite géostationnaire[39] (GEO) ont assuré en moyenne 20 % du total de la masse de satellites placée en orbite (UCS, 2023) (Figure 16).

Sur la même période, la masse de satellites placée en orbites basses[40] (LEO) pour les missions de télécommunications n'est que de quelques pourcentages de la masse totale placée en orbite,

[39] Une orbite à environ 36000 km d'altitude permettant au satellite de rester au-dessus de la même position terrestre. A cette altitude un satellite couvre une grande surface. Trois à quatre satellites géostationnaires suffisent à couvrir la surface terrestre. C'est historiquement l'altitude des satellites de télécommunication et météorologique.

[40] L'orbite basse se situe entre 500 km et 2000 km d'altitude (parfois moins pour l'orbite très basse). Les satellites sont alors défilants autour de la terre à une vitesse d'autant plus grande qu'ils sont bas. La couverture de chaque satellite est

correspondant à une moyenne de moins de 10 tonnes par an. Cependant, elle augmente très rapidement les années suivantes. **La masse de satellites en orbites basses devient plus importante que la masse de satellites de l'ensemble du reste des activités spatiales en 2022 (480 tonnes par an), et va plus que doubler entre 2022 et 2023 (près de 1100 tonnes par an) soit deux ordres de grandeur pris en dix ans.** Parmi ces missions placées en orbites basses, 94 % de la masse est due aux grandes constellations comme Starlink et OneWeb, dont 90 points est due uniquement à Starlink.

Ces missions spatiales visent à constituer un réseau internet satellitaire qui offre une couverture presque intégrale du globe, garantissant de très faibles latences[41], fournissant un très haut-débit, et dont la capacité s'accroît au fil des déploiements.

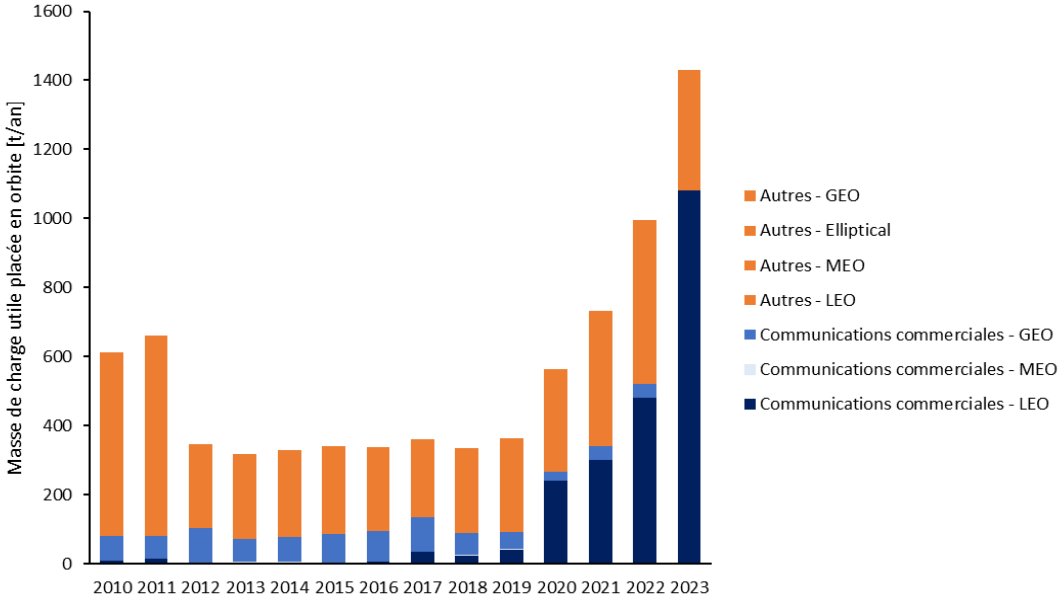


Figure 16 - Evolution de la masse de satellites placée en orbite chaque année 2010-2022
Sources : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport à partir de UCS (UCS, 2023) et Discos (ESA, 2024a)

Cette première approche se consolide en définissant quatre segments : le **segment satellite**, le **segment lanceur** (les fusées pour mettre en orbite les satellites), et en y intégrant les équipements au sol, indispensables au fonctionnement des réseaux satellitaires qui représentent une part non négligeable du total. Les équipements au sol se découpent en deux segments (Figure 17) :

- **Le segment sol opérateur** avec les stations de commande/contrôle d'un côté (souvent mutualisées et conservées longtemps, pour commander la plateforme et la charge utile des satellites) reliées au centre d'opération réseau (NOC), centre d'opération sécurité (SOC) et centre de contrôle du satellite, et les stations de contrôle mission d'un autre côté (gestion de la capacité des satellites, permettant de faire le lien entre le satellite et Internet via une passerelle nommée « Gateway »). Ces stations de contrôle mission sont réparties géographiquement en fonction de la couverture des satellites et de leur capacité. On les appelle communément « Gateway ». Le lieu où sont regroupées ces

alors plus faible, mais la latence peut être meilleure (ainsi que la résolution pour les satellites d'observation de la terre). C'est historiquement l'altitude des satellites d'observation de la terre.

[41] Dans les communications satellitaires, la latence vient majoritairement du temps de trajet du signal aller-retour entre la terre et le satellite. Les satellites GEO, à 36 000 km, impliquent une latence plus importante (~600 ms) que les satellites LEO à quelques centaines de km (~50-150 ms).

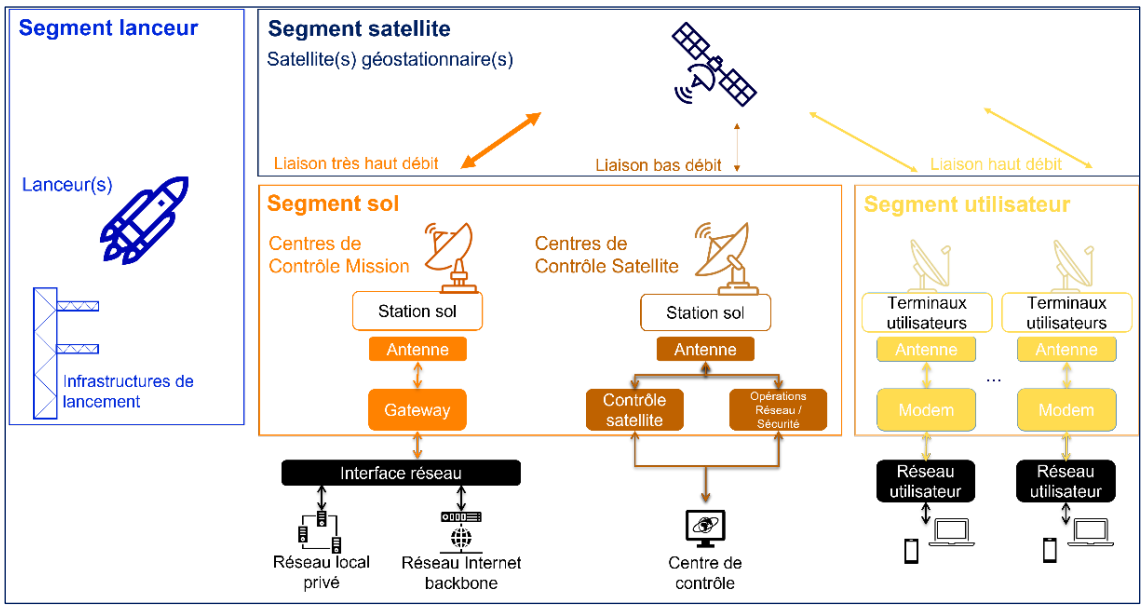
antennes de grande taille est appelé « téléport »[42]; A noter qu'un réseau IP « backbone » relie toutes les stations sols d'un opérateur entre elles ;

- **Le segment utilisateur** avec les équipements ou terminaux utilisateurs, c'est-à-dire une antenne et un modem (qui peut être intégré) pour chaque utilisateur permettant la connexion au satellite.

Le segment sol opérateur et le segment utilisateur : illustrations d'ordres de grandeur

Pour le cas d'une constellation de satellites en orbites basses, Starlink sert aujourd'hui 2,3 millions d'utilisateurs, chacun équipé d'un terminal (antenne + routeur + alimentation) de 4,4kg d'aluminium et de circuits imprimés soit 10 000 tonnes d'équipements. Le réseau dispose aujourd'hui d'une centaine de téléports de 8 antennes chacun (voir « Annexe – Latence, couverture, capacité : coût environnemental de nos choix de services : données et hypothèses »).

Pour le cas des satellites géostationnaires, où un unique satellite peut alimenter plusieurs dizaines de milliers d'utilisateurs, l'empreinte des équipements sol peut devenir absolument prépondérante face à celle du satellite. Une évaluation liminaire de Eutelsat (sur la télévision par satellite) (Eutelsat, 2021) concluait par exemple à un facteur 10 entre l'empreinte du satellite et celle des antennes et à un autre facteur 10 avec celle des modem, soit 1 % de l'empreinte pour le satellite et 99 % pour les équipements au sol.



[42] Un téléport peut être constitué de plusieurs stations sol, elles-mêmes pouvant comporter plusieurs antennes dans le cas des constellations ; les stations intègrent une gateway (passerelle vers internet).

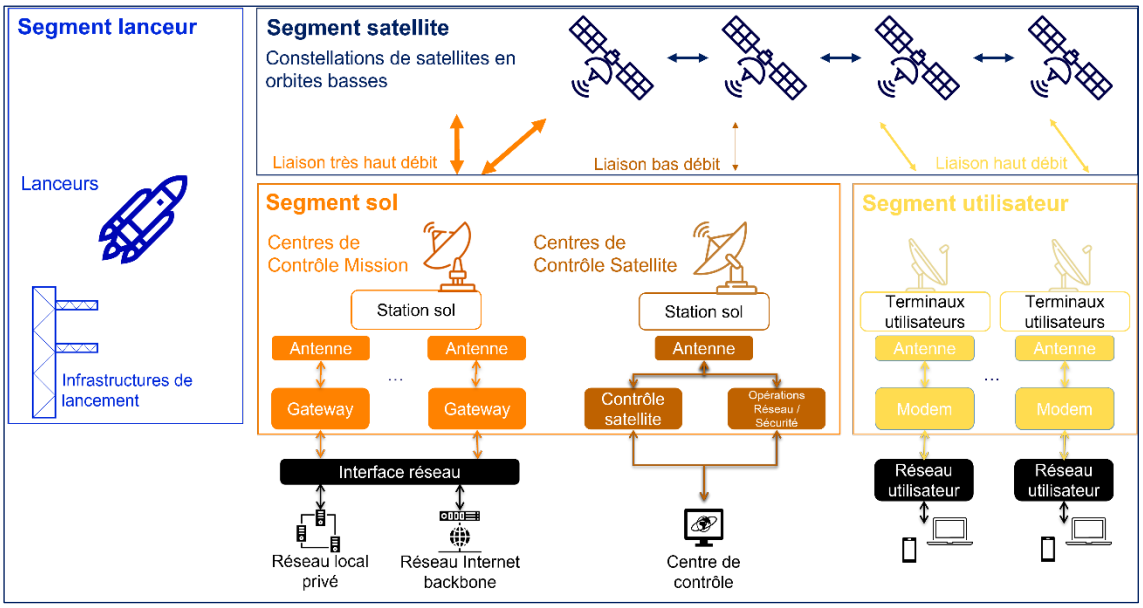


Figure 17 - Aperçu global du périmètre étudié et de l'architecture pour l'accès à internet très haut-débit : solution en orbite basse (en haut) et solution géostationnaire (en bas)
Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport

Si la nouvelle dynamique de déploiement aujourd'hui observée au sein du secteur spatial (cf. « Constellations en orbites basses pour l'accès à internet : prévisions du secteur pour 2020-2050 ») **engendrée par de nouveaux services de connectivité se confirme, le changement d'ordres de grandeur dans la masse de satellites envoyée en orbite constituera un défi supplémentaire pour l'écosystème spatial, complexifiant pour lui l'enjeu de se placer sur une trajectoire de décarbonation compatible avec l'Accord de Paris.**

Le secteur spatial, jusqu'alors relativement stable et posant encore peu de questions quantitatives du point de vue macroscopique en termes d'impact carbone, voit ainsi cette nouvelle dynamique mettre en question sa viabilité vis-à-vis de son impact énergie-climat et des impacts environnementaux, en premier desquels l'appauvrissement de la couche d'ozone (cf. « Les effets hors-CO2 : une forte incertitude à intégrer sur l'impact des segments lanceur et satellite »). Cette nouvelle dynamique questionne aussi la soutenabilité de plusieurs activités liées à l'espace : astronomie (augmentation de la pollution lumineuse) et observation de la terre (via l'augmentation du nombre d'objets en orbite et syndrome de Kessler mais aussi via la concurrence dans l'accès aux positions orbitales et fréquences entre missions spatiales) ainsi que des activités terrestres en cas de pertes de services.

Contexte historique

Le secteur spatial est historiquement lié aux enjeux étatiques et de souveraineté stratégique. Les années 2010 ont vu des baisses inédites de coûts d'accès à l'espace proposées par des acteurs privés, en premier desquels SpaceX. **Les orbites basses se sont illustrées comme le nouveau terrain de jeu d'entreprises investissant massivement** dans des satellites de taille réduite standardisés là où les acteurs historiques, notamment français et européens, produisaient classiquement des satellites en plus petite série à destination de l'orbite géostationnaire. **C'est ce contexte, combinant baisse du coût des lancements, satellites standardisés et accès intense des acteurs privés à l'espace qui a ouvert de nouvelles**

routes satellitaires aux réseaux de communications en s'appuyant sur des constellations de plusieurs centaines, milliers voire dizaines de milliers de satellites[43].

Les effets hors-CO_2 : une forte incertitude à intégrer sur l'impact des segments lanceur et satellite

Le secteur spatial présente des particularités uniques qui font de l'étude de ses impacts environnementaux une nouvelle frontière pour le développement des sciences de l'environnement et du climat. En particulier**, les effets sur l'atmosphère des lancements et des rentrées atmosphériques de satellites ou de lanceurs sont complexes et encore mal connus**. En effet, lors de leur ascension du sol à l'orbite, les lanceurs sont les seuls objets artificiels à émettre dans toutes les couches de l'atmosphère, alors que les autres activités humaines émettent dans sa couche la plus basse, la troposphère[44].

Ces lanceurs y émettent une grande variété de composés du fait de la diversité de combinaisons comburants/carburants (les « ergols ») utilisés dans l'industrie. On y trouve différents gaz à effets de serre, particules et radicaux destructeurs d'ozone (Tableau 4). Les quantités émises peuvent être très difficiles à évaluer du fait de la haute complexité de la combustion dans les moteurs-fusées, de la post-combustion et des interactions entre le panache et l'atmosphère environnante ayant lieu à la sortie de ces moteurs. C'est en particulier le cas pour les émissions de suies, agrégats d'hydrocarbure imbrûlés.

L'effet d'une substance sur le climat ou sur l'ozone varie ensuite en fonction de son altitude d'émission. C'est un phénomène bien connu dans le cas de la vapeur d'eau, puissant gaz à effet de serre dont la contribution au changement climatique est négligeable lorsqu'il est émis au sol (Sherwood S. C. et al., 2018), mais qui joue un rôle dans l'impact climatique de l'aviation (Lee D. S. et al., 2021) et dont l'impact augmente considérablement s'il est émis dans la stratosphère (Pletzer J. et al., 2022). C'est aussi le cas des particules : leur temps de résidence est de quelques jours après émission dans la troposphère, mais de quelques années (3 à 5 ans) après émission dans la stratosphère, dont les dynamiques de circulation atmosphérique sont très différentes (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014). Elles ont donc beaucoup plus de temps pour exercer leur pouvoir de perturbation de l'équilibre radiatif de l'atmosphère via l'absorption de rayonnements lumineux, et leur impact y est donc décuplé. Par exemple, une particule de suie émise par une fusée dans la stratosphère serait 500 fois plus efficace à réchauffer l'atmosphère que la même particule émise au sol (Ryan R. G. et al., 2022).

En conséquence, **pour bien estimer les impacts des lancements, des modèles complexes du climat et de la chimie de l'atmosphère doivent être utilisés. Seules quelques études ont évalué leur effet sur le climat, avec une incertitude importante sur de nombreux paramètres.**

Selon ces études, les lancements seraient aujourd'hui responsables d'un forçage radiatif total sur la stratosphère de l'ordre de 4-16 mW/m^2 (l'estimation basse ne prenant pas en compte les particules d'alumine émises par les moteurs à propulsion solide) , principalement à cause des suies (70 %), de l'alumine (28 %) et dans une moindre mesure de la vapeur d'eau (2 %) (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014; Ryan R. G. et al., 2022). **Ce**

[43] Ces chiffres sont précisés dans la suite du rapport et notamment en annexe (« Annexe – Coût environnemental de la latence par satellite : données et hypothèses »).
[44] L'aviation émet également dans la stratosphère, mais de manière minoritaire.

réchauffement de la stratosphère pourrait résulter en des changements complexes conduisant à des zones de réchauffements et de refroidissements locaux au sol (Maloney C. M. et al., 2022), **mais la littérature reste prudente sur la question, bien qu'une étude récente ait identifié un réchauffement net** (Tsigaridis K. et al., 2024).

Pour comparaison, le forçage radiatif de l'aviation est d'environ 100 mW/m^2, et celui de l'ensemble des activités humaines est de 2,7 W/m^2 (GIEC, 2023). La perturbation apportée par les lancements serait donc de l'ordre de 0,1 à 0,6 % des activités humaines, et de 4 à 16 % de l'aviation, ceci dans le contexte de forte croissance de l'industrie spatiale décrit plus haut.

Le reste des émissions de l'industrie spatiale ayant lieu au sol (production des lanceurs, des satellites, de leurs carburants, opérations, transports etc.) serait de l'ordre 0,01 % en 2018 des émissions mondiales selon la seule publication de référence sur ce sujet (Wilson A. R. et al., 2022). **L'impact climatique de l'industrie spatiale est donc caractérisé par une domination écrasante des effets hors-CO_2 causés par les lancements.** Malheureusement, ces effets **ne sont pas pris en compte** dans les analyses de cycle de vie disponibles : les résultats préliminaires décrits ci-dessus ne sont pas exprimables simplement dans des métriques conventionnelles telles que le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) mesuré en kgCO_2e.

Les lancements affectent également la couche d'ozone en émettant des substances appauvrissant l'ozone (SAO) in-situ. On estime que leur contribution à sa destruction est actuellement de l'ordre de 1 % de celle des CFC responsables du trou dans la couche d'ozone et bannis par le protocole de Montréal, principalement à cause des émissions de la propulsion solide (Ross M. N. & Jones K. L., 2022).

A la fin de leur mission, les satellites en orbite basse[45] et les étages de lanceurs retournent dans l'atmosphère à très haute vitesse et se consument partiellement ou en totalité. Il en résulte des émissions directes de particules métalliques dans les hautes couches de l'atmosphère, mais aussi des dissociations des molécules de l'air conduisant à des oxydes d'azote (NOx) pouvant affecter l'ozone. La masse de matériaux de satellites et de lanceurs injectée annuellement dans l'atmosphère est estimée à 350 tonnes par an (Schulz L. & Glassmeier K-H., 2021), et une étude récente a découvert que 10 % des aérosols présents dans la stratosphère contenaient des particules métalliques issues de satellites et de lanceurs (Murphy D. M. et al., 2023). **Les effets possibles sur le climat, l'ozone ou la formation de nuages polaires stratosphériques sont encore débattus.**

Il reste beaucoup à apprendre sur les impacts atmosphériques des activités spatiales, et **il y a donc un besoin urgent d'avoir davantage de travaux de recherche sur le sujet étant données les tendances nouvelles et très rapides d'évolution de l'industrie**. Des institutions de renom semblent désormais s'attaquer au problème comme la NOAA et la NASA aux Etats-Unis et plus récemment le CNES, le DLR et l'ESA en Europe, mais **les experts partagent la crainte que la croissance de l'industrie aille plus vite que la science et les régulateurs** (New York Times, 2024).

[45] La mission d'un satellite géostationnaire dure 15 à 25 ans. Pour les récentes constellations de satellites en orbites basses, les missions durent entre 5 à 7 ans. La désorbitation d'un étage supérieur de lanceur intervient elle juste après la mise à poste de la charge utile, soit juste à la fin du lancement.

	Impact climatique	Impact sur l'ozone
Émissions et produits post-combustion par les lanceurs (segment lanceur)		
Suies (méthane, kérosène)	Réchauffement de la stratosphère via l'absorption du rayonnement solaire incident. (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014) (Ryan R. G. et al., 2022) Effet résultant sur la troposphère complexe. (Maloney C. M. et al., 2022)	Accélération de la cinétique des réactions destructrices d'ozone en réchauffant la stratosphère. (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014) (Ryan R. G. et al., 2022)
Alumine (propulsion solide)	Réfléchissement du rayonnement solaire incident et absorption du rayonnement terrestre remontant conduisant à un réchauffement net de la stratosphère. (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014)	Accélération de la cinétique des réactions destructrices d'ozone en réchauffant la stratosphère + support de réactions. (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014) (Ryan R. G. et al., 2022)
Chlorine (propulsion solide)	Indirect via déplétion de l'ozone.	Destruction chimique de l'ozone. (Ross M. N. et al., 2009) (Ryan R. G. et al., 2022)
Vapeur d'eau (LH2 et+)	Réchauffement. (Ross M. N. & Sheaffer P. M., 2014) (Pletzer J. et al., 2022; Ryan R. G. et al., 2022)	Négligeable. (Ryan R. G. et al., 2022)
Tous		Tous émettent des composés destructeurs d'ozone. (Ross M. N. et al., 2009)
Émissions à la réentrée des satellites et étages supérieurs de lanceur (segment satellite et lanceur)		
Aluminium et particules métalliques	A déterminer. (Murphy D. M. et al., 2023)	A déterminer. (Murphy D. M. et al., 2023)
Oxydes d'azote	A confirmer.	A confirmer. (Ryan R. G. et al., 2022)

Tableau 4 -Synthèse de l'état de l'art des connaissances sur les impacts des lanceurs et satellites
Sources : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport
à partir des références indiquées dans le tableau

Constellations en orbites basses pour l'accès à internet : prévisions du secteur pour 2020-2050

Afin d'estimer la dynamique du secteur, une projection sur les sept principales constellations a été réalisée à partir des données publiques et de quelques hypothèses (toutes les données utilisées sont disponibles en annexe « Annexe – Constellations en orbite basse : prévisions du secteur pour 2020-2050 : données, hypothèses et modèle »). Deux périodes se distinguent en Figure 18 par :

- Une première période 2022-2035 de déploiement des constellations[46] pour laquelle on observe une croissance de la masse de satellites liée à ce déploiement ;
- Une seconde période 2036-2050 pour laquelle on visualise un plateau lié à une phase de renouvellement seul.

Les évolutions de différents indicateurs (normalisés à partir d'un niveau de référence : l'année 2021 sans constellation) sont également représentées en Figure 19 et permettent de mettre en évidence des dynamiques portant un potentiel d'augmentation très significatif de ces impacts allant d'un facteur 2 pour le nombre de lancements jusqu'à 12.7 pour la vapeur d'eau.

Toujours en partant de l'hypothèse que le déploiement des constellations Starlink et OneWeb débute en 2022, **les projets de constellations considérés seraient collectivement responsables d'une multiplication par 5 des émissions de GES pré-lancement entre 2021 et 2050**. De manière peut-être plus préoccupante, **les émissions de suies et d'alumine seraient multipliées par plus de 6, et celles de vapeur d'eau par près de 13**. **En mettant ces chiffres en perspective avec les estimations de forçage radiatif mentionnées dans la partie précédente, on comprend l'amplitude des conséquences que ces nouveaux projets pourraient avoir sur l'impact climatique du secteur spatial.**

A noter que les phases amonts au sol (en jaune sur la Figure 20), correspondant à la conception, la fabrication et les tests des composants et carburants des satellites et du lanceur, et ne constitue qu'une partie réduite du cycle de vie complet ne permettant pas d'évaluer la totalité des émissions engendrées. Pour les phases de lancement, un modèle climatique complexe serait nécessaire pour évaluer leurs effets sur le climat et l'ozone en raison des émissions à haute altitude.

[46] Afin de simplifier l'analyse, nous partons de l'hypothèse qu'en 2021 le déploiement des constellations n'a pas encore commencé, ce qui est inexact pour OneWeb et Starlink au moins. En revanche, cette approximation ne change pas les conclusions de l'analyse.

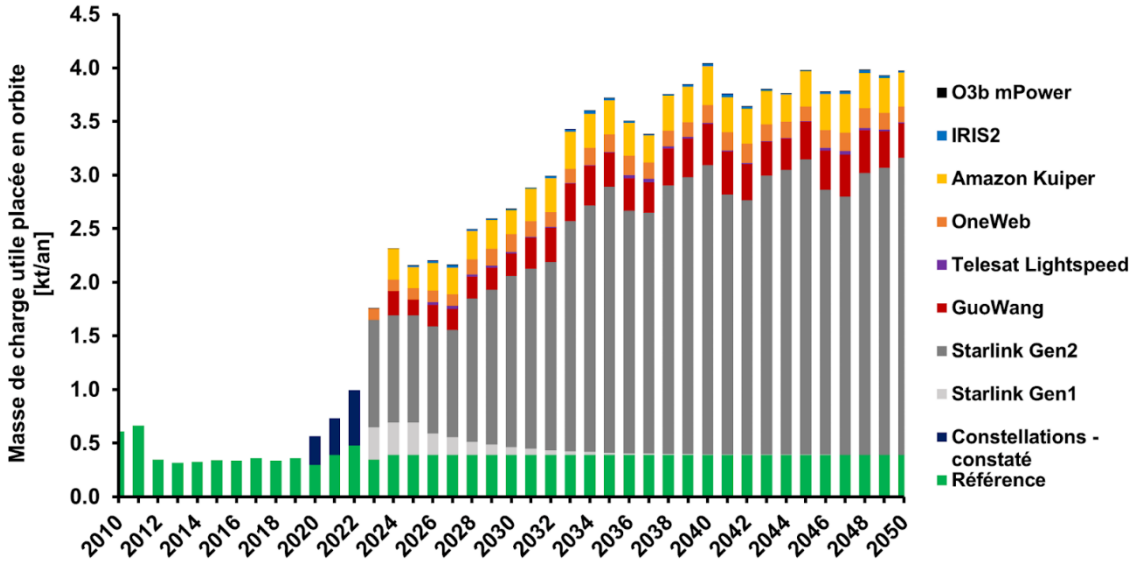


Figure 18 - Evolution de la masse de charge utile placée en orbite : période 2010-2023 issue de la base de données DISCOS (ESA, 2024a) ; projection 2024-2050 issue du modèle (Miraux L. et al., 2022)
Sources : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport

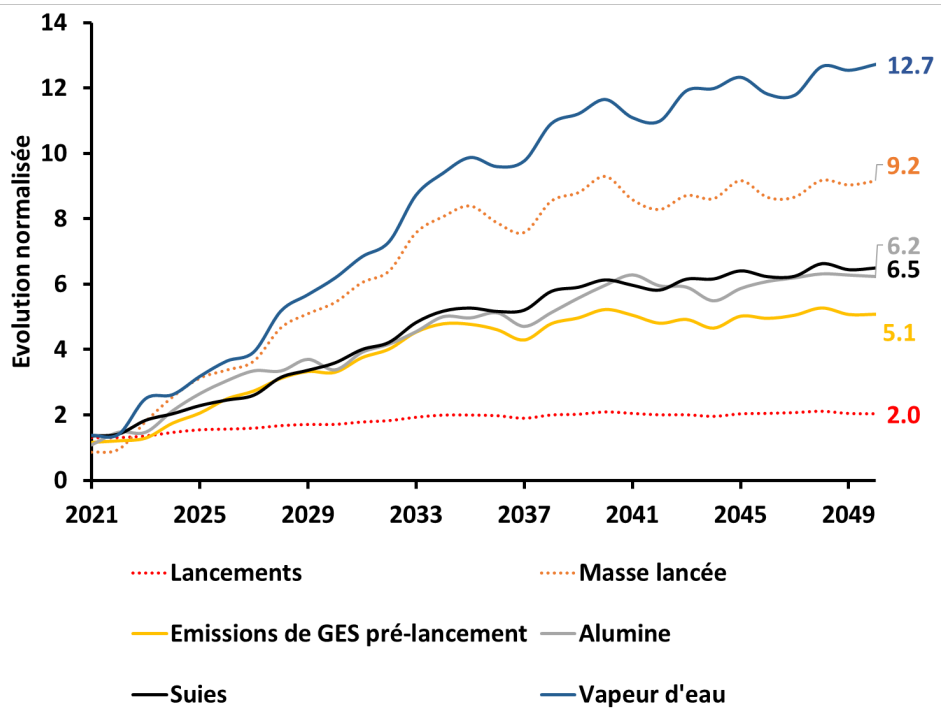


Figure 19 - Conséquences des projets de constellations analysés sur l'évolution des lancements, de la masse lancée et des émissions des activités spatiales issue du modèle (Miraux L. et al., 2022).
Echelle normalisée par rapport à 2021 sans constellation
Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport

Connectivité satellite très haut débit : une nouvelle infrastructure pour le numérique, mais aux logiques et impacts inédits

En première analyse, du point de vue du secteur numérique l'accès à Internet par solution satellitaire peut être considéré comme anecdotique[47] :

- **En nombre d'utilisateurs desservis, l'accès à internet par satellites correspondrait aujourd'hui à environ 0,1 % à 1 %** : avec 3 millions d'abonnés par satellite très haut-débit à date[48] et 71 millions de personnes connectées à internet par satellite dans le monde (accès indirect) (Euroconsult, 2023) pour 5,4 milliards d'utilisateurs internet dans le monde (ITU, 2023)[49] ;
- En trafic, l'accès à internet par satellite pourrait représenter 0.5 %[50] - 1 %[51] à 3 %[52] du trafic internet.

Néanmoins, **malgré des volumes de données encore faibles l'infrastructure spatiale prend une importance croissante et très spécifique au sein de l'écosystème numérique en permettant de répondre à des enjeux politiques et stratégiques de connectivité et de couverture géographique (dont les zones blanches) avec une proposition de services aux performances comparables à certains réseaux terrestres (débits forts, latence faible etc.)** visant les mêmes typologies d'applications et de services.

Les mécanismes à l'origine des impacts carbone-énergie du déploiement des infrastructures spatiales étant absolument différents de ceux à l'œuvre sur la terre ferme (efficacités énergétiques, effets hors-CO_2 lors des phases de lancements et de fin de vie, etc.), leur développement massif n'est pas un simple parallèle des infrastructures terrestres, mais bien un véritable changement de paradigme pour les impacts des services et usages numériques.

[47] A noter toujours que seul le périmètre des télécommunications est considéré et qu'il ne s'agit pas du seul lien entre activités numériques et activités spatiales qui pourraient être préoccupantes d'un point de vue énergie-climat. Par exemple, la croissance exponentielle des constellations d'observation de la terre et leurs volumes de données calculé, analysé et stocké peut aussi l'être (Wilkinson R. et al., 2024).

[48] Source : audition d'expert

[49] Par comparaison, les réseaux mobiles 4G et 5G fixes (FWA, Fixed Wireless Acess), qui offrent des typologies de services et d'usages similaires au satellite très haut débit, rassemblent 132 millions de personnes utilisatrices (Ericsson, 2024).

[50] Sur hypothèse que Starlink transmet 42 Po de données par jour (PCMag, 2024) et que Starlink représente 2/3 du trafic internet par satellite.

[51] Sur hypothèse que les 71 millions d'utilisateurs en ont une consommation moyenne mondiale construite à partir de (Ericsson, 2023; ITU, 2023).

[52] Ou encore sur hypothèse que la consommation des 71 millions d'utilisateurs est celle des utilisateurs en 4G/5G fixe avec les consommations moyennes 4G/5G fixe (Ericsson, 2024).

Les services rendus de télécommunications par satellite : panorama et coûts environnementaux de nos choix de services

Panorama des réseaux de télécommunications satellitaires

Le spectre des missions de satellites de télécommunications (actuelles, passées et futures possibles[53]) s'étale sur une palette d'applications dont les ordres de grandeur caractéristiques diffèrent sur deux axes :

- L'axe services rendus : nombre et localisation d'usagers desservis, type d'usages (grand public, professionnel), service (débit, latence) ;
- L'axe infrastructure : nombre et masse de satellites en orbite nécessaire à la constellation, nombre et caractéristiques des équipements au sol (relais, antennes, modems, terminaux etc.).

[53] Toutes les missions *possibles* ne sont pas listées ; celles considérées sont celles plébiscitées au sein des écosystèmes numérique et spatial.

Panorama satellites et constellations de satellites de télécommunications : services rendus et empreinte matérielle							
Services rendus	**Catégorie**	**Diffusion contenu**	**Accès à internet large bande (broadband)**		**Téléphonie mobile**		**Internet des objets**
	Type de service	**Télévision linéaire**	**Broadband**	**Broadband faible latence**	**Téléphonie / moyen débit**	**Direct-to-cell (ou direct-to-device)**	**Internet des objets faible consommation**
	Caractéristiques du service	N/A	Haut-débit Latence moyenne (600-800ms)	Haut-débit Faible latence (<200 ms)	Téléphonie, échange de données bas à moyen débit (<1 Mbps)	Téléphonie, sms, moyen-débit (bas débit à date)	Petits messages (objets connectés)
	Type de satellite	GEO	GEO	Constellations LEO-MEO	GEO, Constellations LEO	GEO, Constellations LEO	GEO, Constellations LEO
	Type d'utilisateurs	Grand public	Grand public (surtout pays développés) Professionnels : entreprises, gouvernements, maritime, aéronautique, mobilité terrestre, backhaul de réseaux celullaires, trunking, back up		Professionnels partout dans le monde	Grand public (surtout pays développés)	Professionnels
	Nombre d'utilisateurs	SES : **367 millions** d'utilisateurs Eutelsat : 274 millions d'utilisateurs	**500 000** utilisateurs visés pour Konnect VHTS	**2 millions** pour Starlink à date (10 000 en France)		Marché émergent	Quelques millions de terminaux, croissance forte attendue
Empreinte matérielle	**Solutions existantes et masse en orbite (kg)**[54]	Solutions GEO : plusieurs dizaines de satellites **(~5 tonnes)**	Plusieurs dizaines de satellites (Eutelsat, SES, Intelsat, Viasat, Hispasat…) Ka-sat **(6 tonnes)** Konnect VHTS (6.5 tonnes)	Constellationss[55] : - Starlink **(4,425 *260kg + 7500 * [800;1250kg]** - OneWeb (> 648 sats) - Kuiper (>3236 sats) - Telesat Lightspeed (>198 sats) - China SatNet (Guo Wang) (12992 sats) - O3B - IRIS²	- Globalstar (LEO) - Iridium (LEO) - Inmarsat (GEO) - Thuraya (GEO)	- Starlink (dont T-Mobile), - Globalstar (dont Apple), - Iridium, - Inmarsat, - AST mobile, - Lynk Global	Acteurs historiques : Iridium, Inmarsat, Globalstar, Echostar Mobile Nouveaux acteurs : Kineis **(25 x 30kg)**, Astrocast, SWARM, Lacuna Space, Sateliot
	Terminaux utilisateurs[56]	1 parabole + 1 décodeur / foyer	1 parabole + 1 modem + 1 box / foyer	1 antenne + 1 routeur + 1 boitier de raccordement utilisateur / foyer	Terminaux satellitaires spécifiques	Terminaux « standards » (puce/ antenne spécifique)	Objets basse consommation

Tableau 5 - Panorama des services rendus par les infrastructures satellitaires et des empreintes matérielles associées
Source : Aéro Décarbo - The Shift Project, dans le cadre de ce rapport

[54] L'empreinte énergie-climat du **segment satellite** est directement liée à la masse en orbite. En première approche, la masse en orbite est aussi représentative des ordres de grandeur du **segment lanceur** (plus il y a de masse à envoyer en orbite, plus on envoie de lanceurs) et du **segment sol** (plus il y a de satellites avec lesquelles communiquer, plus on utilise d'antennes dans les stations sols pour réaliser la communication).
[55] Voir chiffres en annexe (« Annexe – Constellations en orbite basse : prévisions du secteur pour 2020-2050 : données, hypothèses et modèle »).
[56] En revanche, le **segment utilisateur** est lui relié au nombre d'utilisateurs et à leurs terminaux.

Rendre un service de diffusion linéaire, réaliser des transferts de données entre objets, permettre la téléphonie, l'accès à internet moyen-débit, haut ou très-haut débit ne se fait pas à empreinte matérielle similaire. **En effet, les caractéristiques des services rendus sont intrinsèquement liées aux spécifications et à la taille des infrastructures qui les permettent.** Par exemple, un niveau de service plus riche et à couverture plus large appellera des besoins en maillage satellitaire et au sol plus importants, liés de fait à une empreinte carbone et énergétique croissante.

Depuis plusieurs dizaines d'années (des premiers balbutiements d'Internet à l'omniprésence des contenus vidéo consommables en mobilité aujourd'hui), la multiplication et la superposition des usages observées dans la structuration des services numériques appellent des spécifications et empreintes matérielles croissantes pour les réseaux, comme démontré entre autres dans le reste de ce rapport et au cours des travaux précédents de The Shift Project (The Shift Project, 2021, 2024c). **Les réseaux satellitaires ne font pas exception : les mobiliser pour atteindre des niveaux de services plus riches (contenus vidéo de haute résolution et personnalisés avec la vidéo à la demande), plus complexe (jusqu'à par exemple proposer des services d'accès à Internet dans les avions en combinant la connectivité par satellite à l'usage complémentaire d'antennes relais au sol[57]) et plus fiable (latences faibles) réclame une empreinte matérielle croissante.**

Les dynamiques les plus inflationnistes en termes d'impacts sont celles tirant les spécifications de services (couverture, débit et connectivité, latence) simultanément vers le haut. Comprendre les tendances structurantes de l'évolution des impacts environnementaux du système « numérique-satellite télécom » étant l'objet de cette étude, il s'agit ici de caractériser les spécificités des services les plus intenses en matières et en énergie : les services d'accès à internet très haut débit.

L'accès à internet très haut débit depuis l'espace peut s'appuyer sur plusieurs types d'architectures de réseaux satellitaires, dont les caractéristiques vont très largement différer suivant, en tout premier lieu, l'altitude de leur orbite :

- Les satellites géostationnaires (GEO), à 36 000 km, permettent de proposer un service stable et large spectre (débit fiable, latence stable) pour un maillage à peu de points (entre un et quelques satellites, la distance importante à la terre permettant une grande couverture géographique). Ils sont très pertinents pour des applications dites de diffusion (par exemple la vidéo par satellite) et le sont pour l'instant pour l'Internet en mobilité (notamment maritime, par exemple sur des bateaux de croisière) ;
- Les constellations de satellites en orbite basse (LEO), principalement situées entre 500 et 2000 km, permettent de déployer un niveau de service comparable à celui des infrastructures terrestres (mobile 4G et fixe fibre) en réduisant notamment grandement la latence par rapport au GEO avec leur distance à la surface bien plus faible. Cette caractéristique en fait de bons candidats pour les applications nécessitant de nombreuses étapes d'échanges pour charger un contenu, pour les applications nécessitant de faibles latences (jeux vidéo, voix dans une moindre mesure) mais au prix d'une variabilité plus forte sur la qualité de service et d'un besoin très intense en maillage (plusieurs centaines à plusieurs milliers de satellites simultanément en orbite) ;
- Les orbites intermédiaires (MEO, pour « Medium Earth Orbit ») autour de 8000 km permettent, elles, d'atteindre un niveau de latence intermédiaire aux solutions GEO et LEO, tout en réduisant l'importance du maillage appelé.

[57] Projet Inmarsat pour l'European Aviation Network

Les débits pouvant être fournis sur ces trois types d'orbite sont comparables à ceux de certaines solutions terrestres (fixe fibre et mobile 4G par exemple). C'est sur la latence que la différenciation est importante : celle-ci s'étalant de 600 ms pour le GEO à 30 ms pour le LEO.

En revanche **le choix de l'orbite pour la solution satellitaire influe de manière continue sur** deux paramètres essentiels :

- **Le nombre de satellites nécessaires pour assurer la couverture continue des zones voulues** (qui peut conditionner l'empreinte matérielle et environnementale de l'infrastructure, selon sa capacité). La contrepartie physique des orbites basses étant le défilement des satellites : un satellite à 500 km reste environ 12 minutes en visuel d'un point de la terre. Assurer la couverture continue d'un point sur Terre par le LEO nécessite ainsi une multiplication du nombre de satellites, d'autant plus importante que l'orbite est basse (et donc que la latence est faible) et nécessite des antennes plus complexes pour suivre les satellites.

- **Le niveau de latence du service final rendu** : 600 ms pour le GEO à 30 ms pour le LEO. Facteur aujourd'hui fortement différenciant dans les applications et usages connectés (santé, industrie, culture et loisirs, jeux vidéo etc.) (The Shift Project, 2021, 2024c), le niveau de latence semble ainsi être l'un des paramètres clés de l'orientation des choix technologiques pour l'accès très haut débit depuis l'espace, et donc de l'empreinte carbone-énergie de l'infrastructure qui en découle.

Enfin, le déploiement capacitaire, qu'il soit lié à un nombre d'utilisateurs (ou leurs utilisations du réseau et les types de service utilisés) ou qu'il soit lié à un investissement infrastructurel massif, jouera aussi sur la taille du réseau satellitaire, une fois la couverture acquise.

Latence, couverture, capacité : coût environnemental de nos choix de services

Afin d'illustrer les dynamiques sous-jacentes à la conception de réseaux satellitaires expliquées dans la partie précédente, trois systèmes ont été étudiés : un satellite placé en orbite géostationnaire GEO (le satellite Konnect VHTS) et deux constellations de satellites (OneWeb et Starlink).

L'analyse s'inspire de (Osoro B et al., 2023) mais en considérant un périmètre différent : segment lanceur pour Osoro ; segment lanceur (sans prise en compte des effets hors-CO_2) ainsi que segments satellite, sol et utilisateur ici. L'ensemble des données et hypothèses est à retrouver en annexe (« Annexe – Latence, couverture, capacité : coût environnemental de nos choix de services : données et hypothèses »).

Sans surprise, les empreintes carbone sont reliées aux empreintes matérielles[58] : le nombre croissant de lancement, de masse de charge utile, de téléports et d'utilisateurs engendre presque un ordre de grandeur d'écart entre les impacts des différents systèmes. On observe aussi que **le segment utilisateur est loin d'être négligeable** comme mentionné en première partie de ce chapitre.

[58] En effet pour les trois systèmes les nombres de lancements, de masse de charge utile en orbite, de téléports et d'utilisateurs sont rangés en ordre croissant.

L'empreinte annuelle de la constellation Starlink (Figure 20) **s'élève à plus de 1600 ktCO_2e/an, soit près de 2 fois les réseaux fixes et mobiles français en 2020**[59] **pour 2 millions d'utilisateurs à date. Cette empreinte n'est pas appelée à décroître puisque l'ensemble de l'infrastructure est à remplacer tous les 5 ans.** La solution professionnelle OneWeb implique elle aussi une empreinte carbone conséquente (autour de 600 ktCO_2e) là où la solution géostationnaire paraît plus modérée avec 65 ktCO_2e/an d'empreinte annuelle (d'autant plus que 90 % de son empreinte est dédié au segment utilisateur, à savoir le kit utilisateur).

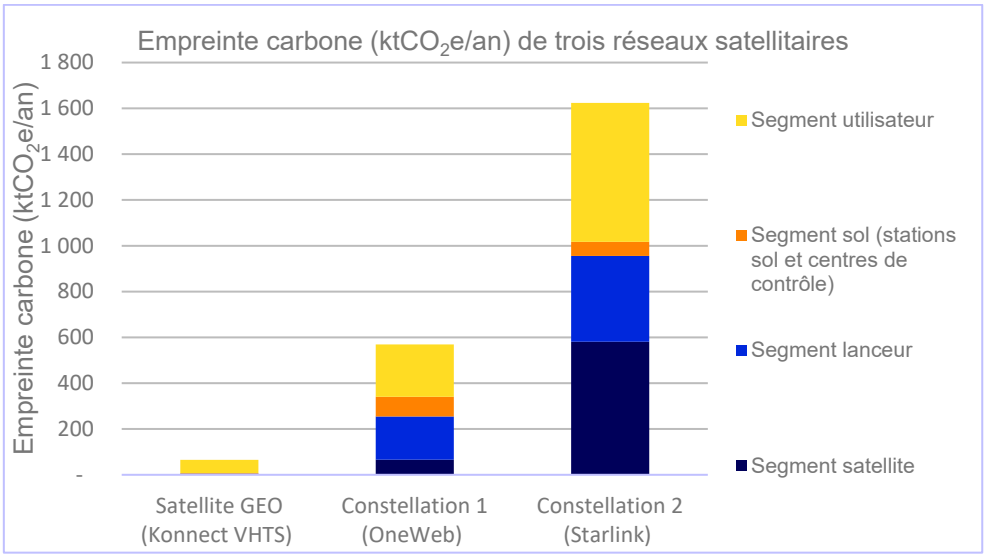


Figure 20 – Empreinte carbone annuelle des réseaux satellitaires et décomposition par segment
Source : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport

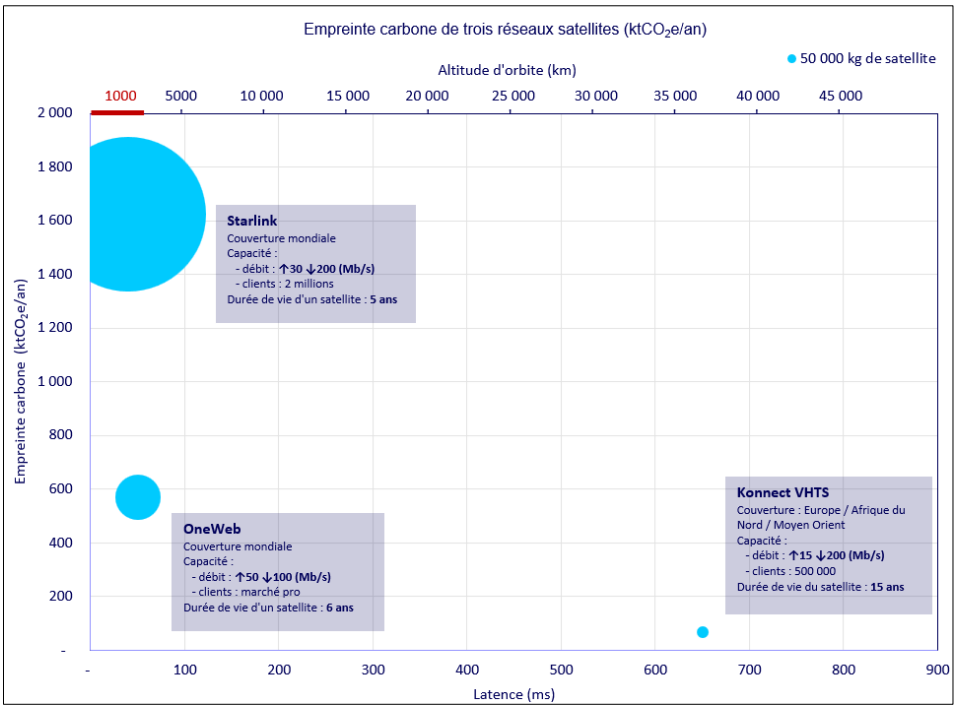


Figure 21 – Empreinte carbone annuelle des réseaux satellitaires
Source : Aéro Décarbo – The Shift Project dans le cadre de ce rapport

[59] (ADEME & Arcep, 2023)

La Figure 21 permet de décrire les dynamiques sous-jacentes à la construction des constellations ainsi qu'expliquer le coût environnemental considérable de la constellation Starlink :

- Un satellite géostationnaire comme Konnect VHTS (apportant du très haut débit avec des latences de l'ordre de 600ms) ne couvre qu'un tiers du globe ; il en faudrait 3 pour assurer une couverture intégrale (hors pôles) ;
- Un objectif de latence faible implique des solutions en orbites basses et donc appelle un nombre de satellites plus élevé (50 à 100) pour assurer une couverture continue ;
- Au-delà de ce nombre de satellites, le nombre de satellites est fonction du déploiement capacitaire réalisé (modulo les priorités entre satellites). Dit autrement, s'il ne fallait amener ce service qu'à un nombre limité de personnes, la constellation ne serait pas de taille si importante.

Cette première approche dans l'analyse méritera à l'avenir d'être renversée afin de construire un modèle environnemental pour les satellites et constellations de satellites de télécommunications tel que celui construit pour les réseaux mobiles dans le cadre de ce rapport. Il s'agira d'être en mesure de répondre à la formulation conséquentielle suivante : selon des scénarios de couverture et de niveaux de service, quelle est l'infrastructure réseau déployée et pour quelles implications énergétiques et climatiques ? Ceci dans l'optique de pouvoir se tourner vers des approches « *backcasting* », qui permettront de construire un système numérique sobre et résilient (voir « L'approche « backcasting » : dimensionner au vu des contraintes »).

Conditions de pertinence des satellites pour l'accès à internet très haut débit

Aujourd'hui (Figure 23)**, les réseaux satellitaires d'accès à internet sont considérés principalement comme des compléments de couverture géographique ou des solutions d'attente, tout comme la 4G/5G fixe.**

Figure 22– Etat des lieux de l'utilisation de l'accès à internet par satellite
Source : Aéro Décarbo - The Shift Project dans le cadre de ce rapport[60]

[60] Audition d'experts, retours des ateliers collaboratifs et (Arcep, 2023c)

En particulier, les satellites et constellations de satellites sont aujourd'hui avant tout sollicités pour fournir un accès internet haut-débit ou très haut débit lorsque :

- L'isolement ou la configuration géographique rendent la connexion par réseau filaire (ADSL, fibre ou câble) ou radio terrestre techniquement difficile (Arcep, 2023c),
- Lorsque le débit ADSL est faible,
- En attendant le déploiement de la fibre optique (Arcep, 2023c), et éventuellement pour des lieux où l'extinction du cuivre serait en amont du déploiement de la fibre.

C'est la combinaison *très haut débit x très faibles latences* qui est en jeu dans l'empreinte environnementale des constellations de satellites très haut-débit en orbite basse : des missions spatiales avec de faibles débits (des relevés de données par exemple) sont réalisées avec des infrastructures bien plus réduites que les constellations de satellites *broadband*. La combinaison de spécifications est source d'impacts environnementaux croissants, et cette dynamique est récurrente au sein du système numérique : on l'observe pour les réseaux terrestres, comme développé dans les autres parties de ce rapport, mais également sur les usages qui génèrent ces besoins directement. Dans les jeux vidéo (dont les besoins ont longtemps été concentrés sur la latence, avant d'y ajouter de gros appels en débits), les usages en ligne courants (le temps de chargement d'une page internet étant fonction de la multiplication du nombre de requêtes et des latences, et de la réalisation des protocoles de sécurité, mais aussi des volumes de contenus avec une croissance soutenue des contenus vidéos) ou les nouvelles promesses d'usages des mondes virtuels, la course conjointe aux débits et à la latence engendrent des inflations fortes des impacts carbone et énergie (The Shift Project, 2024c).).

En zones blanches, les satellites géostationnaires permettent un accès à internet très haut débit ; les constellations en orbites basses permettent d'y accéder avec des latences faibles. Dit autrement, la couverture de zones blanches peut être assurée avec des satellites géostationnaires, les constellations en orbites basses apportant un service « haut de gamme » sans compromis, à savoir la combinaison « très haut débit, faibles latences et couverture intégrale ».

En France, la couverture en fibre optique actuelle atteint 84 % de la population (Arcep, 2023f) et le Plan France Très Haut Débit vise une généralisation de la fibre sur l'ensemble du territoire à horizon 2025 (Ministère de l'économie, des finances, et de la souveraineté industrielle et numérique, 2023). A l'échelle européenne (Commission européenne, 2023), c'est une « amorce de service grand public » qui se prépare avec la constellation IRIS^2 visant un service à faible latence[61]. Mais à l'échelle mondiale, ce sont 591 millions de personnes qui pourraient utiliser une solution satellitaire (Euroconsult, 2023) parmi les 2,6 milliards de personnes n'ayant pas accès à internet (Euroconsult, 2023; ITU, 2022). Si la solution choisie était équivalente en empreinte carbone à celle de Starlink, cela reviendrait à multiplier l'empreinte annuelle de cette constellation par des facteurs 100 à 1000.

Instruire une stratégie sur la place des satellites de télécommunications dans un système numérique sobre et résilient requiert donc pour chaque contexte une analyse d'empreinte environnementale pour divers scénarios faisant varier le taux de couverture par fibre et par satellite (GEO comme LEO), et déterminant les conditions (type d'usages à satisfaire, densité de population, alternatives existantes etc.) pour lesquelles les coûts carbone respectifs deviennent équivalents.

Les satellites et constellations de satellites fournissent également un accès à internet haut débit pour des systèmes mobiles (voir section « Panorama des réseaux de télécommunications

[61] Pour des investissements de l'Union Européenne à hauteur de 2.4 milliards d'euros (L'usine digitale, 2023c).

satellitaires ») : systèmes terrestres en mouvement (avions, bateaux, voitures connectées[62] etc.) ou plus récemment directement à des terminaux « standards »[63] avec des fonctionnalités dite « *direct-to-device* », « *direct-to-cell* »[64], le développement des protocoles 5G NTN et l'ambition que la 6G permette l'avènement de la convergence terrestre – satellite[65] (marché émergent). La place de ces solutions reste à étudier en regard de leur coût environnemental.

Faire des infrastructures satellitaires une brique pertinente d'un système numérique sobre

Les services satellites de connectivité « haut de gamme » (très haut débit, faibles latences, couverture intégrale) ainsi que l'investissement dans le déploiement capacitaire des constellations impliquent un important changement de dynamique (taille croissante des constellations, durées de vie réduites des satellites etc.) qui, combiné aux incertitudes sur les effets « hors-CO_2 » des activités en haute atmosphère, peut décupler l'impact climatique du secteur spatial :

- **Les tendances mondiales en nombre de lancements et en masse envoyée en orbite sont incompatibles avec la maîtrise de l'empreinte environnementale du secteur spatial**. Ces tendances sont le résultat des constellations de satellites d'accès à internet très haut-débit et très faibles latences, aujourd'hui synonymes de réduction des durées de vie prévues des satellites, nécessitant de fait un renouvellement plus fréquent de la flotte et donc davantage de lancements ;
- **Les lacunes**, persistantes à date, dans les connaissances scientifiques sur les effets des particules émises au lancement et à la réentrée des satellites dans l'atmosphère, à la fois sur le climat et sur l'ozone, **requièrent, en parallèle d'une réduction à moyen-terme des incertitudes, des prises de décision en conséquence** ;
- Seules les missions spatiales d'accès à internet haut-débit sont traitées dans nos présents travaux, en vertu de leur importance quantitative. **L'évaluation du coût environnemental de nos choix de services (latence, couverture, capacité) d'accès à internet par satellite interroge notamment sur les conditions de pertinence et la place des satellites et constellations ainsi que sur les stratégies de couverture des zones blanches** ;
- **Une réflexion sur les trajectoires de décarbonation possibles pour le secteur spatial et sur la place du secteur dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone fixés par la France à l'horizon 2050 ne pourra faire l'économie d'un examen approfondi de la gamme des missions de télécommunications qu'il mène.**

[62] Et plus récemment à des tracteurs avec la mise en place d'un partenariat entre John Deere, fabricant de matériel agricole et SpaceX (L'usine digitale, 2024)
[63] Par opposition aux terminaux satellitaires historiquement spécifiques.
[64] Avec deux types de solutions : les solutions propriétaires comme Apple en partenariat avec Globalstar pour des messages d'urgence et la solution Snapdragon Satellite pour des messages textes bidirectionnels par satellite (L'usine digitale, 2023a, 2023b) ; ou des standards internationaux comme la 5G NTN (Non Terrestrial Network).
[65] (6GSNS, 2021; ESA, 2024)

Rendre les infrastructures réseaux compatibles avec la double contrainte carbone

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 résilientes que possible face aux nouveaux risques**.

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

- Les risques physiques :
  - Variabilité croissante des conditions météorologiques dans un climat instable avec les **événements extrêmes** qui en résultent de façon plus fréquente et plus intense (risques de dommages pour les points hauts et les infrastructures fixes en cas de tempête, d'incendie ou d'inondation par exemple) ;
  - **Approvisionnement en énergie** (contraintes sur les énergies fossiles, usages concurrents sur l'électricité, coupures du réseau électrique en cas d'événement météorologique extrême etc.) ;
  - **Approvisionnement en équipements et composants techniques** (dépendances aux conditions géologiques, techniques, géopolitiques et climatiques dans lesquelles se déploient les chaînes de valeur des métaux, des terres 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 (opérateurs, régulateurs, industriels) du domaine des réseaux doivent donc intégrer dans leurs stratégies les conclusions issues notamment de l'instruction des questions suivantes :

- Une stratégie maximaliste (Tableau 1, Tableau 2), visant à déployer les réseaux de la manière la plus large possible et avec les meilleures performances possibles afin de permettre le maximum d'applications potentielles (y compris non encore identifiées), est-elle compatible avec ces enjeux de résilience ?
- Quelles convergences et divergences y a-t-il entre les choix permettant de maximiser la résilience face aux risques climatiques et d'approvisionnement et ceux permettant de répondre 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) ?

Placer nos systèmes numériques – et les réseaux en particulier – sur une trajectoire sobre et cohérente avec la double contrainte carbone permet d'amorcer dès maintenant une trajectoire plus résiliente pour nos usages et services connectés, de nature à préserver leurs apports essentiels au fonctionnement de nos sociétés. Ceci tout en **redonnant à l'ensemble des parties prenantes du numérique le temps et les moyens d'ajuster ses dynamiques technologiques et économiques**.

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

L'ordre de grandeur des changements de dynamiques à effectuer impose de recourir à l'ensemble des leviers à notre disposition pour transformer les infrastructures réseaux. Les leviers technologiques sont indispensables, mais insuffisants s'ils ne sont pas agencés avec les leviers sociétaux et organisationnels : **la décarbonation du numérique implique non seulement des décisions techniques, mais également sociétales et politiques**.

C'est l'approche systémique qui permettra, en mobilisant **les quatre familles d'actions** aux bons endroits et bon niveau, de réorienter les réseaux vers un futur compatible avec la double contrainte carbone :

- La mesure et la transparence ;
- L'optimisation et l'écoconception systémique ;
- La réorganisation collective vers la sobriété ;
- La formation et les nouvelles compétences.

Pour ce faire, l'ensemble des parties prenantes devra être mobilisée, chacune portant la capacité et la responsabilité d'initiation de certains de ces leviers :

- Les acteurs de la décision et du pilotage publics :
  - Pouvoirs publics ;
  - Acteurs publics de la planification carbone-énergie ;
  - Acteurs publics de la régulation et planification numérique ;
  - Acteurs publics régulateur et opérant du spatial ;
- Les acteurs produisant des analyses techniques sur le secteur et ses impacts environnementaux :
  - Acteurs produisant des standards et conventions pour les méthodologies d'impact ;
  - Acteurs produisant des évaluations d'impact des équipements réseaux ;
  - Monde académique ;
- Les acteurs économiques du secteur numérique, tout au long de sa chaîne de valeur :
  - Fournisseurs d'équipements réseaux ;
  - Opérateurs réseaux ;
  - Acteurs des télécommunications et systèmes spatiaux ;
  - Fournisseurs de services numériques (éditeurs, contenus et applications) ;
  - Organisations utilisatrices du numérique ;
- Les acteurs de la formation initiale (universités, écoles d'ingénieurs, écoles des métiers du numérique etc.).

La liste des recommandations ici présentées formule les prochaines étapes à enclencher par les parties prenantes pour enclencher la transformation des infrastructures réseaux.

Pour les mettre en place de manière pertinente, il s'agira de mobiliser les bons acteurs et de s'assurer que les conditions de pertinence de chaque levier sont réunies. **Cet éventail complet des leviers à mobiliser, de leur condition de pertinence et, pour chacun, la liste des acteurs étant en position de les initier sont également disponibles de manière détaillée en annexe** (« Annexe – Recommandations détaillées : actions à mener et acteurs à mobiliser »).

Mesure et transparence
Objectif 1 : Assurer l'exhaustivité, la transparence et la robustesse des évaluations d'impacts environnementaux des équipements et services réseaux.
Assurer la disponibilité des données nécessaires aux études d'impact, de manière publique et transparente.
Encadrer les méthodologies d'évaluation d'impacts autour de principes permettant de les rendre transparentes et comparables, reconnues et auditables.
Prendre en compte de manière systématique et transparente les différentes phases du cycle de vie des équipements réseaux (production, transport, usage, fin de vie).
Elaborer une méthode suffisamment robuste pour l'évaluation des impacts des infrastructures lanceurs et satellites.
Objectif 2 : Disposer d 'un cadre de référence quantitatif pour le pilotage du secteur numérique sous la double contrainte carbone.
Instaurer une trajectoire carbone de référence pour le secteur numérique en France (- 30 % de 2020 à 2030) et en Europe.
Intégrer une évaluation suffisamment consolidée de la consommation électrique du numérique dans les exercices de planification nationaux (RTE, DGEC, SGPE) pour l'intégrer dans l'exercice de bouclage.
Intégrer la performance énergétique et la performance environnementale dans les critères d'évaluation des opérateurs par le régulateur.
Objectif 3 : Produire les indicateurs permettant de réorienter les stratégies numériques pour les rendre compatibles avec la double-contrainte carbone.
Mise à disposition par les fournisseurs d'équipements et de services auprès des clients (grand public et entreprises ou organisations) de données et d'indicateurs environnementaux sous un format adapté et homogène.
Développer la remontée d'informations sur la consommation électrique des équipements.
Elaborer et standardiser des indicateurs de coût carbone par fonctionnalité, spécification ou service, afin d'éclairer les arbitrages à mener dans les choix technologiques pour nos futurs services.

Optimisation
Objectif 1 : Eco-concevoir les équipements réseaux pour permettre de réduire leur consommation électrique.
Maximiser et optimiser l'extinction de cellules en fonction du trafic (*sleep mode*) par bande de fréquences et technologie et développer la modulation de la puissance de transmission.
Mettre en place une métrologie permettant un suivi et une limitation de la consommation des équipements réseaux.
Objectif 2 : Optimiser les stratégies de déploiements et les stratégies technologiques pour réduire la consommation électrique en phase d'opération.
Etudier les effets bénéfiques potentiels, de la réduction des plages de fréquences utilisées.
Orienter les recherches et innovations visant l'optimisation des ressources réseaux (utilisation de l'IA, outils d'optimisation etc.) vers une baisse de la consommation énergétique absolue à débit ou capacité constants, plutôt que vers une augmentation des performances.
Piloter le déploiement des infrastructures satellites au regard des besoins et des études d'impact énergie-carbone en évitant redondance et empilement.
Objectif 3 : Réduire les impacts carbone de production, de déploiement et d'opération des équipements réseaux.
Intégrer des critères carbones dans les cahiers des charges de construction des sites, afin de favoriser le recours à des méthodes et matériaux bas carbone.
Mettre en place les cadres comptables, techniques et stratégiques permettant d'allonger la durée de vie et de favoriser la réutilisation des équipements réseaux.
Structurer les filières de collecte, tri, réparation et traitement des équipements réseaux et box internet afin d'en réduire les impacts de la phase de fin de première vie.
Objectif 4 : Promouvoir des évolutions technologiques facilitant l'optimisation des réseaux.
Implémenter une fonctionnalité d'orientation automatique des terminaux vers la connexion Wifi lorsque détectée
Produire des directives claires sur l'adoption des codecs vidéo les plus efficaces réduisant la consommation de bande passante.

Réorganisation collective vers la sobriété
Objectif 1 : Endiguer l'inflation des usages très consommateurs en données.
Conditionner l'augmentation du trafic ou des performances des infrastructures réseaux au respect de la trajectoire de réduction des impacts carbone-énergie du réseau.
Adopter une stratégie de déploiement ciblé de la 5G sur des usages et sites prioritaires.
Faire de la réduction de l'impact environnemental absolu des réseaux un critère angulaire du cahier des charges de la 6G.
Encadrer les débits maximums des usages pouvant devenir dimensionnants, comme les caméras de télésurveillance.
Introduire un référentiel d'éco-conception des services numériques au sein du marché : • Activation par défaut d'un mode économie de données pour la fourniture de contenu et pour les terminaux ; • Intégration d'une fonction « audio-only » sur les plateformes vidéo ; • Résolution par défaut ajustée au type de terminal ; • Rendre inaccessibles les plus hautes résolutions (4K et 8K) en réseau mobile sur les tablettes et smartphones, pour les limiter aux usages techniquement pertinents ; • Interdiction de l'auto-play et des designs de défilement continu sans interaction minimale avec l'utilisateur (par exemple via une option « afficher plus »).
Dimensionner les équipements sur une portion de trafic plus large que l'heure chargée.
Objectif 2 : Rendre possible le changement de paradigme nécessaire aux nouveaux arbitrages sur les infrastructures pour les rendre sobres.
Généraliser à d'autres services numériques que la vidéo l'adaptation automatique du débit au type de terminal utilisé.
Assurer la compatibilité des cahiers des charges (existants, à venir) des réseaux mobiles avec les objectifs énergie-climat en effectuant les arbitrages en couverture et déploiements capacitaires (fixes, mobiles, satellites) et les objectifs de desserte.
Elaborer une charte de sobriété des transferts de données numériques.

Formation et compétences
Objectif : Permettre à toutes les parties prenantes d'atteindre le niveau de compréhension des enjeux et d'expertise technique nécessaires à la mise en place des nouveaux paradigmes.
Déployer des formations continues systématiques et obligatoires aux enjeux énergie-climat et aux impacts du numérique.
Intégrer dans les formations initiales des métiers réseaux les connaissances nécessaires à la conception et au déploiement de réseaux éco-conçus et sobres.

Conclusion : les réseaux, un point de pivot vers un numérique sobre ?

Les dynamiques du numérique sont aujourd'hui insoutenables vis-à-vis de la double contrainte carbone. Le secteur opère dans une logique d'abondance s'appliquant aussi bien à ses infrastructures qu'aux systèmes d'usages associés. Cela engendre une inflation de ses impacts énergétiques et environnementaux trop forte pour être contenue par des progrès technologiques et d'efficacité, pourtant fulgurants. Il s'expose ainsi à une perte de résilience face à une raréfaction probable des ressources (énergétiques, matérielles) dont il dépend.

Les technologies numériques sont devenues une pierre angulaire de nos sociétés et de leur capacité à fonctionner. Bifurquer vers une logique de sobriété et de discernement est donc nécessaire mais exige de 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**.

Les réseaux, point de pivot vers la sobriété et la résilience

Les travaux menés dans le cadre de ce rapport ont permis de mettre en évidence **l'impact déterminant sur le dimensionnement des réseaux mobiles de choix collectifs en matière de développement de nouveaux services et de modalités d'accès (géographique, temporel) à ces services**. Il apparaît ainsi que seule la **combinaison de leviers d'éco-conception (systémique plutôt que fonctionnelle) et de sobriété est susceptible de rendre nos réseaux mobiles compatibles avec la double contrainte carbone** : allongement de la durée de vie des équipements, gains d'efficacité énergétique, modification des contraintes réglementaires, mutualisation, suspension du déploiement d'une 6G telle qu'imaginée aujourd'hui, maîtrise de la croissance des usages.

Il conviendra dans une prochaine étape, en s'appuyant sur une approche en « *backcasting* »[66], de construire la vision quantitative relative à l'ensemble des infrastructures réseau (réseaux fixes, réseaux mobiles, réseaux satellitaires), afin d'identifier une trajectoire compatible avec la double contrainte carbone. Si les évolutions des réseaux fixes de la prochaine décennie sont largement déterminées par des choix stratégiques déjà effectués, la partie satellitaire, elle, fait figure de nouvelle venue dans l'écosystème réseaux, avec des ambitions loin d'être négligeables, encore à déterminer et

[66] Voir partie « L'approche en « backcasting », outil de construction d'un numérique sobre », p. 44.

pouvant devenir déterminantes pour les impacts environnementaux de l'ensemble du système dans lequel elle s'inscrit.

Si les centres de données en sont les cœurs battants, les réseaux sont le système nerveux du numérique mondial. En cela, les acteurs et parties prenantes de cet écosystème qui les conçoivent, les exploitent et les utilisent, peuvent impulser des transformations structurelles indispensables à la construction d'un numérique à la hauteur des enjeux de ce siècle. Parce qu'ils connaissent la matérialité et les réalités de l'inertie et des possibilités au croisement du système technique et des systèmes d'usages qui s'y branchent, les acteurs du réseau possèdent une vision qui combine naturellement les deux ingrédients-clés, physique et systémique, des défis qui seront les nôtres pour encore quelques décennies.

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.), **le constat selon lequel un choix technologique est un choix sociétal** est devenu incontournable.

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, 2023b), nous préconisions de suivre les étapes de construction et de 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 d'identifier et d'organiser la mise en œuvre des **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.

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 (et territorial) sur la place du numérique dans la société transformée.

Ces espaces doivent impliquer :

- Les pouvoirs publics,
- Les organes régulateurs,
- Les communautés professionnelles,
- Les acteurs économiques concernés,
- 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 concertation et une coordination des parties prenantes.**

Documenter les points de repère de ce que sera un numérique français, européen et international véritablement cohérent avec les enjeux de ce siècle : il faudra pour cela mettre l'énergie nécessaire à la construction d'une vision systémique du système numérique dans son ensemble, qui soit accessible et utilisable par les acteurs comme autant de points de repère pour leur propre transformation et celle de leurs écosystèmes, fournisseurs, chaînes de valeur, partenaires. Décrire l'éventail des possibles pour nos équipements et services, une fois ceux-ci compatibles avec la double contrainte carbone. Cette vision sera la base permettant d'éclairer le débat sur l'organisation du système numérique : la gouvernance des infrastructures, la souveraineté des données, la cybersécurité, les modèles économiques qui le sous-tendent... Pour se construire le cap et la méthode de navigation d'un numérique conçu pour le XXIème siècle.

Références

6GSNS. (2021). Smart Networks and Services Joint Undertaking : Decision of the governing board of the Smart Networks and Services Joint Undertaking No 12/2021. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-networks-and-services-joint-undertaking

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

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

Arcep. (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-communiques/detail/n/5g-7.html

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

Arcep. (2022b). 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/lempreinte-environnementale-du-numerique/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html

Arcep. (2023c). Fibre, ADSL, satellite… Quelle technologie pour mon accès à internet ? https://www.arcep.fr/demarches-et-services/utilisateurs/fibre-adsl-satellite-quelle-technologie-pour-mon-acces-a-internet.html

Arcep. (2023d). 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. (2023e). 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

Arcep. (2023f). Marché du haut et du très-haut débit fixe. https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiques/detail/n/marche-du-haut-et-du-tres-haut-debit-fixe-071223.html

Arcep. (2023g). Observatoire des communications électroniques. https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/observatoire-des-communications-electroniques/

Arthur D Little. (2023). The evolution of data growth in Europe. Evaluating the trends fueling data consumption in European markets. https://www.adlittle.com/en/insights/report/evolution-data-growth-europe

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

Basdevant A., François C., Ronfard R. (2022). Mission exploratoire sur les métavers. https://www.economie.gouv.fr/files/files/2022/Rapport-interministeriel-metavers.pdf

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

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.).

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

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

Commission européenne. (2023). IRIS^2 : The new EU Secure Satellite Constellation Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/iris2_en

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

Despois, T. (2020). 5G 28 GHz high efficiency integrated phased array transceivers. https://www.theses.fr/2020BORD0151

Direction Générale des Entreprises. (2022). Les technologies immersives. https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/politique-numerique/technologies-immersives

Ericsson. (2023). Ericsson Mobility Report, November 2023. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2023

ESA. (2024). Space for 5G & 5G. https://connectivity.esa.int/space-5g

Euroconsult. (2023). 2.6 billion remained unconnected to broadband at the end of 2022 – a $74 billion untapped opportunity. https://www.euroconsult-ec.com/press-release/2-6-billion-remained-unconnected-to-broadband-at-the-end-of-2022-a-74-billion-untapped-opportunity/

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

European Commission. (2023). An EU initiative on Web 4.0 and virtual worlds : A head start in the next technological transition. https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/library/eu-initiative-virtual-worlds-head-start-next-technological-transition

Eutelsat. (2021). Télévision par satellite : Et si on parlait empreinte carbone ? https://www.eutelsat.com/files/PDF/fr/groupe/Etude_empreinte_carbone_2021.pdf

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

GIEC. (2023). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis—Chapter 7—The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/earths-energy-budget-climate-feedbacks-and-climate-sensitivity/AE57C97E588FF3060C7C7E47DD4F3C6E

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. (2022). Measuring digital development, Facts and figures. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2022/

ITU. (2023). Statistics—Individuals using the internet. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx

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-I/en

Kim et al. (2023). Korea's leadership in 5G and beyond : Footprints and futures. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308596123001246

Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., Doherty S. J., Freeman S., Forster P. M., Fuglestvedt J., Gettelman A., De León R. R., Lim L. L., Lund M. T., Millar R. J., Owen B., Penner J. E., Pitari G., Prather M. J., … Wilcox L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689

Lightreading. (2024). Kakao wins 28GHz auction to become South Korea's fourth operator. https://www.lightreading.com/regulatory-politics/kakao-wins-28ghz-auction-to-become-south-korea-s-fourth-operator

Lunden D. et al. (2022). Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators. https://doi.org/10.3390/su14052637

L'usine digitale. (2023a, janvier 6). Qualcomm annonce Snapdragon Satellite, une solution de communication satellaire bidirectionnelle. https://www.usine-digitale.fr/article/qualcomm-annonce-snapdragon-satellite-une-solution-de-communication-satellaire-bidirectionnelle.N2082986

L'usine digitale. (2023b, mars 2). Voici venu le temps des satphones 5G. https://www.usine-digitale.fr/article/mwc-2023-voici-venu-le-temps-des-satphones-5g.N2106991

L'usine digitale. (2023c, mai 2). Airbus, Thales et Orange s'allient pour bâtir la constellation européenne de satellites Iris2. https://www.usine-digitale.fr/article/airbus-thales-et-orange-s-allient-pour-batir-la-constellation-europeenne-de-satellites-iris-2.N2128916

L'usine digitale. (2024, janvier 18). John Deere fait appel à SpaceX pour connecter ses tracteurs en toutes circonstances. https://www.usine-digitale.fr/article/john-deere-fait-appel-a-spacex-pour-connecter-ses-tracteurs-en-toutes-circonstances.N2206745

Malmodin J. et al. (2023). ICT Sector Electricity Consumption and Greenhouse Gas Emissions—2020 Outcome. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4424264

Maloney C. M., Portmann R. W., Ross M. N., & Rosenlof K. H. (2022). The Climate and Ozone Impacts of Black Carbon Emissions From Global Rocket Launches. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021JD036373

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

Ministère de l'économie, des finances, et de la souveraineté industrielle et numérique. (2023). Plan France Très Haut Débit : Déploiement de la fibre optique partout en France d'ici 2025. https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/plan-france-tres-haut-debit-fibre-optique

Murphy D. M., Abou-Ghanem M., Cziczo D. J., Froyd K. D., Jacquot J., Lawler M. J., Maloney C. M., Plane J. M. C., Ross M. N., Schill G. P., & Shen X. (2023). Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles. https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2313374120

New York Times. (2024, janvier 9). The new space race is causing new pollution problems. https://www.nytimes.com/2024/01/09/science/rocket-pollution-spacex-satellites.html

Osoro B, Oughton E., Wilson A. R., & Rao A. (2023). Sustainability assessment of Low Earth Orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations. https://www.researchgate.net/publication/373715821_Sustainability_assessment_of_Low_Earth_Orbit_LEO_satellite_broadband_mega-constellations

Pletzer J., Hauglustaine D., Cohen Y., Jöckel P., & Grewe V. (2022). The climate impact of hydrogen-powered hypersonic transport. https://acp.copernicus.org/articles/22/14323/2022/

Qualcomm Japan. (2023). [Titre traduit] Propositions pour favoriser l'usage des ondes 5G/millimétriques. Transférer le succès de la 5G/onde millimétrique à la 6G. https://www.soumu.go.jp/main_content/000860192.pdf

Ross M. N. & Jones K. L. (2022). Implications of a growing spaceflight industry : Climate change. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468896722000386

Ross M. N. & Sheaffer P. M. (2014). Radiative forcing caused by rocket engine emissions. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013EF000160

Ross M. N., Toohey D., Peinemann M., & Ross P. (2009). Limits on the Space Launch Market Related to Stratospheric Ozone Depletion. https://www.researchgate.net/publication/248947473_Limits_on_the_Space_Launch_Market_Related_to_Stratospheric_Ozone_Depletion

Ryan R. G., Marais E. A., Balhatchet C. J., & Eastham S. D. (2022). Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2021EF002612

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

Schulz L. & Glassmeier K-H. (2021). On the anthropogenic and natural injection of matter into Earth's atmosphere. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117720307663

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

Sherwood S. C., Dixit V., & Salomez C. (2018). The global warming potential of near-surface emitted water vapour. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae018

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. (2019). Climat : L'insoutenable usage de la vidéo en ligne. The Shift project. https://theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/

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. (2023a). Energie, climat : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ? - Orienter nos choix technologiques vers la sobriété numérique.

The Shift Project. (2023b). Planifier la décarbonation du système numérique en France : Cahier des charges. https://theshiftproject.org/article/planifier-la-decarbonation-du-systeme-numerique-en-france-cahier-des-charges/

The Shift Project. (2024). [Energie, Climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients—Materials] Données issues de la modélisation du modèle Réseaux.

The Shift Project. (2024a). [Energie, Climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients—Materials] Empreinte carbone réseaux satellitaires.

The Shift Project. (2024b). [Energie, Climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients—Materials] Modèle Réseaux.

The Shift Project. (2024c). Energie-climat : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ?

Tsigaridis K., Field R., Bauer S. E., Ross M. N., Maloney C. M., Schmidt G. A., & Rosenlof K. H. (2024). Composition and Climate Impacts of increasing launches to Low Earth Orbit. https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2024-2168

WIA. (2023). Wireless Infrastructure By The Numbers 2022 Key Industry Statistics. https://wia.org/wireless-infrastructure-by-the-numbers-2022-key-statistics/

Wilkinson R., Mleczko M.M., Brewin R.J.W., Gaston K.J., Mueller M., Shutler J.D., Yan X., & Anderson K. (2024). Environmental impacts of earth observation data in the constellation and cloud computing era. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072121

Wilson A. R., Vasile M., Maddock C. A., & Baker K. J. (2022). Ecospheric life cycle impacts of annual global space activities, Science of The Total Environment. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722023981

ZDNet. (2022). Home Tech Smartphones 5G South Korea cancels 5G 28GHz spectrum allocation to telcos due to « lack of spending ». https://www.zdnet.com/article/south-korea-cancels-5g-28ghz-spectrum-allocation-to-telcos-due-to-lack-of-spending/

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone.
Nous sommes une association loi 1901 d'intérêt général, guidée par l'exigence de la rigueur scientifique. Notre mission consiste à éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique.

www.theshiftproject.com

Contacts

Hugues Ferreboeuf
Chef de projet Numérique
hugues.ferreboeuf@theshiftproject.org

Maxime Efoui-Hess
Coordinateur du programme Numérique
maxime.efoui@theshiftproject.org

Marlène de Bank
Ingénieure recherche – Technologies numériques
marlene.debank@theshiftproject.org

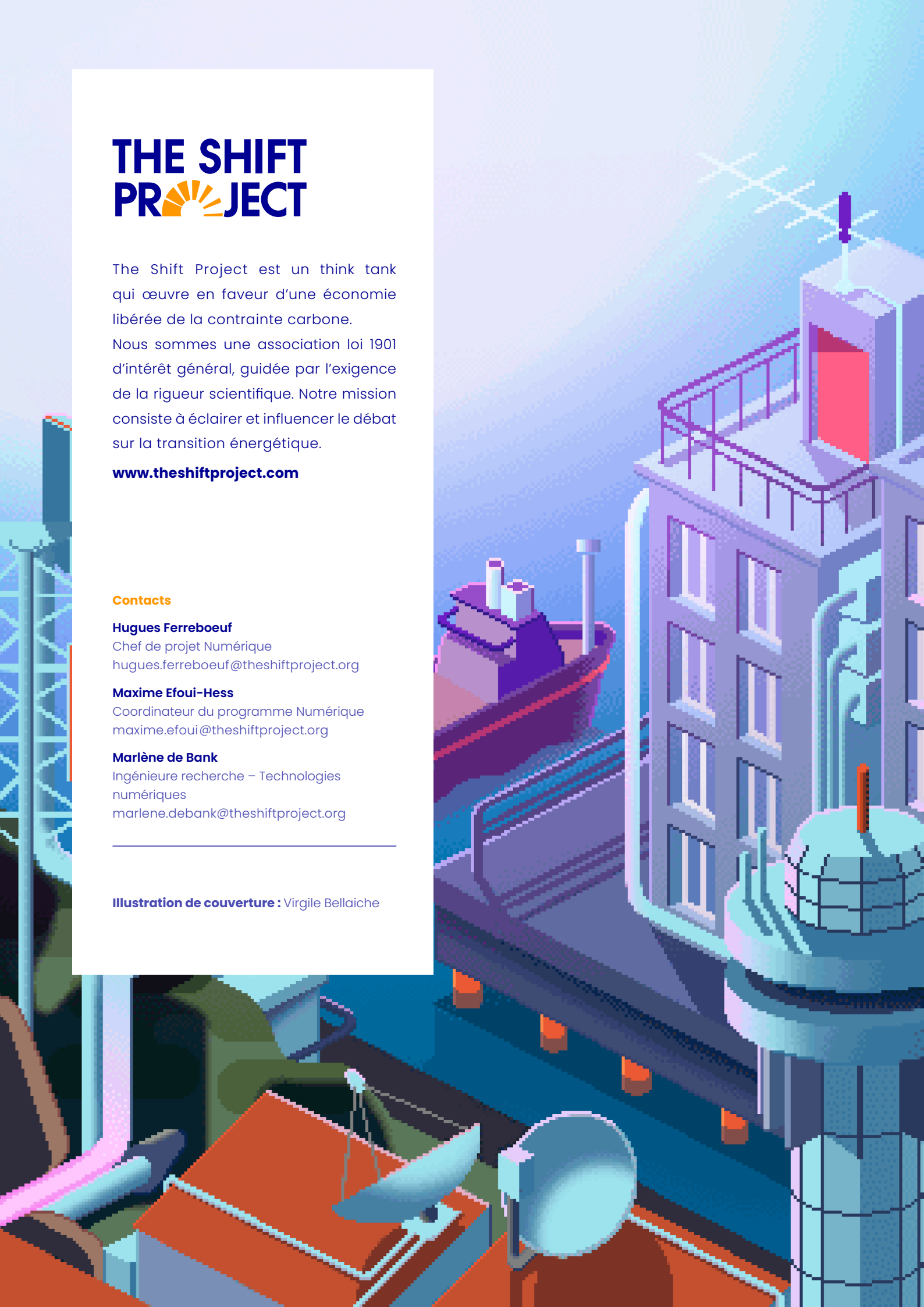



Illustration de couverture : Virgile Bellaiche