

Synthèse des résultats de l'étude réalisée par le cabinet **Analysys Mason** pour le compte de l'Arcep sur l'évolution des usages sur les réseaux de télécommunications sans fil et le dimensionnement des réseaux

1 Introduction et objectifs de l'étude

Dans le cadre de ses missions en matière de gestion des ressources radioélectriques, l'Arcep estime nécessaire d'être en capacité d'anticiper les scénarios d'évolution des usages qui pourraient avoir des conséquences sur les besoins en dimensionnement des réseaux sans fil, notamment en ce qui concerne la mobilisation de nouvelles bandes de fréquences.

Plusieurs bandes de fréquences harmonisées pour le déploiement des réseaux mobiles en France métropolitaine sont disponibles ou susceptibles d'être disponibles :

- à court/moyen terme, notamment les bandes 3410 – 3490 MHz, 1427 – 1517 MHz (dite « bande 1,4 GHz »), le haut de la bande 6 GHz (6425 – 7125 MHz), la bande 26 GHz, ou
- à plus long terme comme la bande 42 GHz et la bande 470 – 694 MHz.

Dans ce contexte, l'Arcep a commissionné une étude pour disposer d'éléments prospectifs sur l'évolution des usages sur les réseaux sans fil et réaliser des simulations de besoins en dimensionnement des réseaux de télécommunications sans fil selon différents scénarios et hypothèses. L'objectif de l'étude est d'éclairer l'Arcep sur :

- les risques de congestion des réseaux sans fil en fonction des différents scénarii d'évolution des usages sur ces réseaux ;
- les bénéfices potentiels de l'usage du haut de la bande 6 GHz (c'est-à-dire la plage 6425 MHz – 7125 MHz), selon qu'elle serait exploitée par des réseaux Wi-Fi ou des réseaux cellulaires.

Cette note restitue sommairement les livrables de l'étude et ses principaux enseignements en présentant :

- une description de l'approche méthodologique suivie par le consultant pour évaluer les projections de la demande et les différents scénarii de déploiement de réseaux sans fil ;
- les principaux résultats de l'étude en termes de nombre de sites mobiles incrémentaux nécessaires pour satisfaire la demande en fonction des hypothèses de déploiement de réseaux, et une estimation de l'impact carbone associé ;
- les principaux enseignements de l'étude, ses conclusions et ses limites.

Cette note est une synthèse des analyses menées par **Analysys Mason**. Ses conclusions ne préjugent pas des orientations et décisions de l'Autorité sur sa politique de gestion de spectre radio électrique. L'objectif en rendant public ce document est de contribuer dans le cadre d'une logique exploratoire et prospective – à date et avec des hypothèses bien définies – à une meilleure compréhension, de l'impact des évolutions des usages sans fil sur les réseaux radio et la place dévolue à l'utilisation du spectre dans cette donne.

Par ailleurs, afin de disposer d'une analyse critique des résultats de cette étude, l'Autorité a été appuyée, tout au long de la conduite de l'étude, en qualité de conseil, par un comité consultatif de relecture composé de 4 experts académiques¹. L'Autorité rend également public l'avis collégial de ce comité sur l'étude et ses enseignements.

¹ Clément Marquet (Chargé de recherche au Centre de Sociologie de l'Innovation, Mines Paris – PSL), James F. Kurose (Professeur à l'Université de Massachusetts (E.U) et chercheur invité à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI –

2 Approche méthodologique

Le périmètre de l'étude comprend trois volets :

- **Volet 1** : simuler le volume de trafic selon plusieurs scénarios d'évolution des usages et de la demande de connectivité via les réseaux sans fil, déclinée selon différents cas d'usages (web, streaming, gaming, XR...);
- **Volet 2** : modéliser différents scénarios de déploiement de réseaux (cellulaires, Wi-Fi, satellite) pour répondre à l'évolution de la demande, sous différentes hypothèses (par exemple : patrimoine spectral disponible).
- **Volet 3** : évaluer l'impact carbone associé aux différents scénarii de déploiement de réseau et d'évolution de la demande.

2.1 Volet 1 : évolution de la demande

2.1.1 Périmètre des usages considérés dans l'étude et leurs projections :

a) Catégorisation des usages considérés dans l'étude

Le modèle se concentre sur les usages du service internet mobile, qui sont ceux qui génèrent le plus de trafic et entraînent des exigences les plus fortes en matière de capacités et performances des réseaux.

La voix, les SMS et l'IoT simple² sont exclus du modèle car ils ne sont pas dimensionnants par rapport à ces cas d'usage plus exigeants.³ Par ailleurs, l'impact de l'intelligence artificielle (IA) est pris en considération dans chacun des cas d'usage modélisés, sans faire l'objet d'une catégorie de cas d'usage en tant que telle (par exemple l'utilisation d'un outil d'IA générant du texte est considérée comme contribuant au trafic du cas d'usage « Navigation Web et téléchargement de fichiers »). L'impact de l'IA sur le trafic par cas d'usage, ainsi que sur le ratio entre le trafic montant et descendant fait néanmoins l'objet d'importantes incertitudes.

Le Tableau 1 ci-dessous donne un aperçu des cas d'usage de la connectivité sans fil inclus dans le modèle et de leurs caractéristiques.

Tableau 1 – Aperçu des cas d'usage considérés dans l'étude [Source : Analysys Mason, 2025]

Catégorie de cas d'usage	Localisation	Fonctionnalités réseau requises	Exemples de cas d'usages
Navigation Web et téléchargement de fichiers	Principalement en intérieur	<ul style="list-style-type: none">• Forte bande passante	<ul style="list-style-type: none">• Utilisation typique du trafic de données par les consommateurs
Streaming (vidéo, musique, etc.)	En intérieur et extérieur	<ul style="list-style-type: none">• Forte bande passante• Faible latence	<ul style="list-style-type: none">• Streaming vidéo (par exemple Netflix)• Streaming de musique (par exemple Spotify)
Communication en temps réel sur les applications OTT ⁴	En intérieur et extérieur	<ul style="list-style-type: none">• Faible latence	<ul style="list-style-type: none">• Appels vidéo• Jeux vidéo en temps réel

Sorbonne)), Jean-Samuel Beuscart (Professeur à Sciences Po Medialab) et Marios Kountouris (Professeur à EURECOM, France).

² C'est-à-dire les connexions IoT générant très peu de trafic.

³ Bien que ces connexions IoT simples puissent être très nombreuses, leur trafic individuel est si faible que le trafic total qu'elles génèrent reste négligeable pour le dimensionnement d'un réseau sans fil.

⁴ Des cas d'usage basés sur les fonctionnalités « 5G NR New Calling » (<https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/wp-content/uploads/2023/10/GSMA-Foundry-5G-New-Calling-Revolutionising-the->

Catégorie de cas d'usage	Localisation	Fonctionnalités réseau requises	Exemples de cas d'usages
Réalité augmentée, étendue et virtuelle (AR, XR et VR)	En intérieur et extérieur	<ul style="list-style-type: none"> Forte bande passante Faible latence 	<ul style="list-style-type: none"> Jeux Expériences immersives/support opérationnel Formation/éducation Jumeaux numériques
Véhicules connectés et autonomes	En extérieur	<ul style="list-style-type: none"> Faible latence Communication ultra-fiable Forte bande passante à certains niveaux d'autonomie 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation par les particuliers Transports publics Véhicules d'urgence Drones
IoT complexe, analyse de données à haut débit	En intérieur et extérieur	<ul style="list-style-type: none"> Forte bande passante Faible latence Communication ultra-fiable 	<ul style="list-style-type: none"> Réseau électrique intelligent et villes intelligentes Maintenance prédictive/détection des défauts
Robotique/télémanipulation de machines	Principalement en intérieur	<ul style="list-style-type: none"> Forte bande passante Faible latence Communication ultra-fiable 	<ul style="list-style-type: none"> Maintenance à distance Processus automatisés

b) Revue des données de trafic historiques et des prévisions existantes

Les prévisions de demande par cas d'usage ont été faites sur la base d'une étude bibliographique qui a permis d'identifier des données utiles notamment auprès de l'IBPT⁵, d'Ericsson⁶ et de Sandvine⁷.

c) Projection de chaque catégorie de cas usage

Les prévisions par cas d'usage pour chaque scénario ont été construites sur la base du trafic par terminal et du nombre de terminaux, qui varient d'un scénario à l'autre. Les données d'entrée pour ces éléments ont été tirées de la littérature dans la mesure du possible, et sont autrement des estimations d'Analysys Mason basées sur son expertise du secteur⁸.

Communications-Services-Landscape.pdf) peuvent être considérés comme des exemples de communication en temps réel OTT.

⁵ <https://www.bipt.be/operators/publication/bipt-council-communication-of-14-april-2020-on-the-report-of-capgemini-invent-of-march-2020-concerning-the-evolution-of-mobile-data-associated-with-licensed-spectrum-in-belgium-and-the-impact-of-the-presence-of-media>

⁶ <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer?f=8&ft=2&r=1&t=1,20&s=4&u=3&y=2023,2029&c=3>

⁷ https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/2024/GIPR/GIPR%202024.pdf

⁸ Etant donné que les prévisions de trafic ont été établies au 2^e semestre 2024 au moment de la réalisation de l'étude, ces prévisions prennent donc en compte les données jusqu'à fin 2023. Par ailleurs, l'étude a calibré le facteur de déport du trafic cellulaire vers les réseaux Wi-Fi par localisation du cas d'usage, afin que dans le scénario de demande « médian », et considérant le patrimoine spectral actuel des opérateurs mobiles (le scénario de réseaux A), le nombre de nouveaux sites en 2025 soit dans une fourchette cohérente avec l'effort de sites déployés sur les années précédentes.

Par ailleurs, le volume de trafic projeté pour chaque cas d'usage est réparti entre géotypes, de « grands centres urbains » à « rural à habitat très dispersé », définis à partir des données de l'INSEE⁹, permettant ainsi d'obtenir une distribution territorialisée de la demande à chaque année.

Afin d'évaluer les besoins en dimensionnement des réseaux sans fil, la modélisation a porté sur le niveau de trafic au moment le plus chargé de la journée, plutôt que le niveau moyen de trafic tout au long de la journée. En effet, la charge du réseau varie à différents moments de la journée et pour différents utilisateurs, la modélisation de la charge à l'heure de pointe a été effectuée par Analysys Mason à l'aide de son expertise. Les valeurs de paramètres utilisées sont présentées dans Tableau 2.

Tableau 2 - Paramètres de modélisation de l'heure de pointe

Nombre de jours chargés annuels	Trafic dans les jours chargés	Trafic dans l'heure chargée
250	75 % du trafic annuel	6,18 % du trafic journalier

2.1.2 Scénarios d'évolution de la demande :

Les prévisions de demande sont ensuite établies par cas d'usage, et regroupées en quatre scénarios d'évolution du trafic :

- **Scénario « Sobriété des usages »** : Dans ce scénario, l'adoption des cas d'usage grand public tel que constaté augmente parallèlement à la population, mais le niveau d'usage par utilisateur reste constant. Les cas d'usage grand public avancés diminuent au fil du temps et les cas d'usage industriels stagnent à leur niveau actuel.
- **Scénario « Médian »** : Dans ce scénario, l'évolution des cas d'usage grand public et industriels suit les tendances historiques, avec des demandes de trafic accrues et une plus grande adoption.
- **Scénario « Numérisation accrue »** : Dans ce scénario, l'adoption des cas d'usage de base et la croissance du trafic par appareil augmentent au-dessus des niveaux historiques. L'adoption des cas d'usage avancés augmente au-dessus des niveaux historiques, mais le trafic par appareil suit les tendances historiques.
- **Scénario « Usages disruptifs »** : Dans ce scénario, l'adoption des cas d'usage de base et la croissance du trafic par appareil augmentent au-delà des niveaux historiques. L'adoption des cas d'usage avancés et le trafic généré par cas d'usage avancé augmentent au-delà des niveaux historiques.

L'estimation de la probabilité des scénarios d'usages est laissée à l'appréciation du lecteur.

Le Tableau 3 illustre les tendances sur les deux inducteurs principaux (trafic par utilisateur, nombre d'utilisateurs/abonnés) déterminant la dynamique des 4 scénarii de l'évolution des usages.

⁹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6686472>

Tableau 3 – Illustration des dynamiques d'évolution des cas d'usage pour chaque scénario de la demande ((+) inducteur en croissance, (-) inducteur en décroissance, (≈) inducteur stable/faiblement variable)

Catégorie de cas	« Sobriété des usages »		« Médian »		« Numérisation accrue »		« Usages disruptifs »	
	Abonnés	Trafic par abonné	Abonnés	Trafic par abonné	Abonnés	Trafic par abonné	Abonnés	Trafic par abonné
Navigation Web et téléchargement de fichiers	+	≈	+	+	+	++	+	++
Streaming (vidéo, musique, etc.)	+	≈	+	+	+	++	+	++
Communication en temps réel sur les applications OTT	+	≈	+	+	+	++	+	++
Réalité augmentée, étendue et virtuelle	-	≈	+	+	++	++	++	+++
Véhicules connectés et autonomes	≈	≈	+	+	++	++	++	+++
IoT complexe, analyse de données à haut débit	≈	≈	+	+	+	++	++	++
Robotique/ télémanipulation de machines	≈	≈	+	+	+	++	++	++

Les Figure 1 à Figure 4 illustrent l'évolution du trafic par cas d'usage dans chaque scénario.

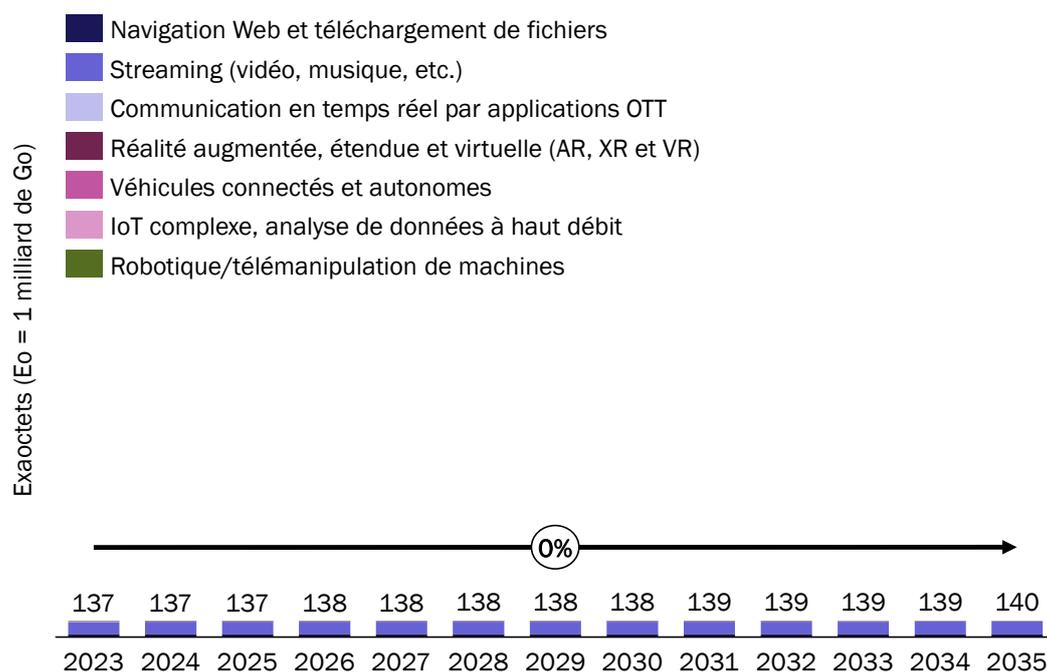


Figure 1 – Trafic par cas d'usage dans le scénario « sobriété des usages » [Source : Analysys Mason, 2025]

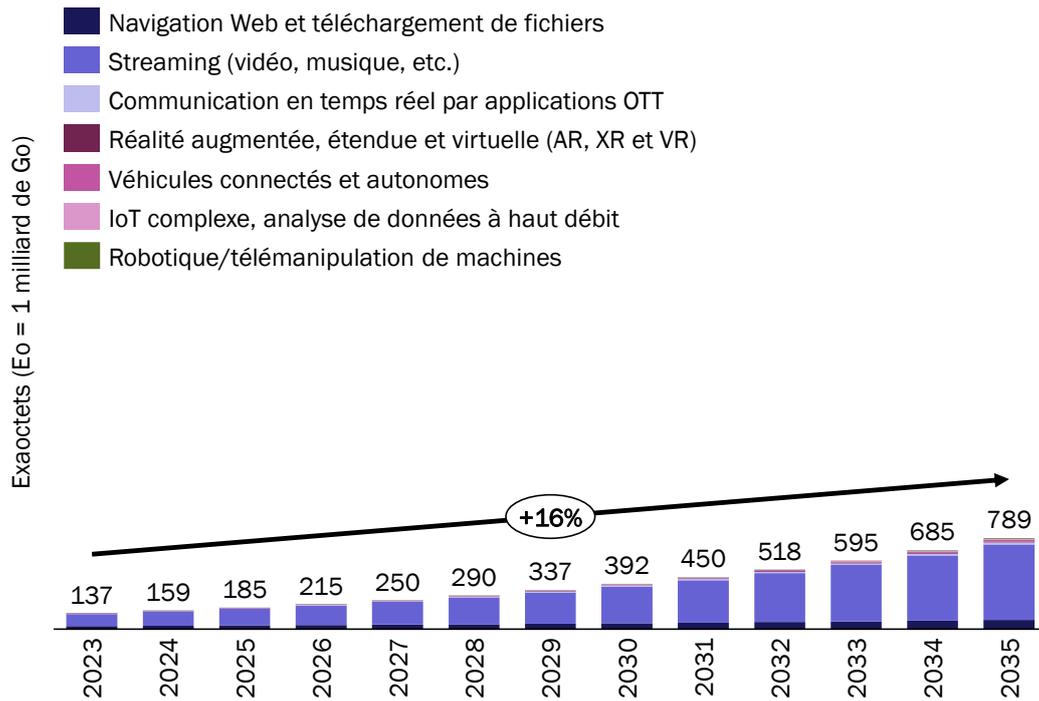


Figure 2 - Trafic par cas d'usage dans le scénario « médian » [Source : Analysys Mason, 2025]

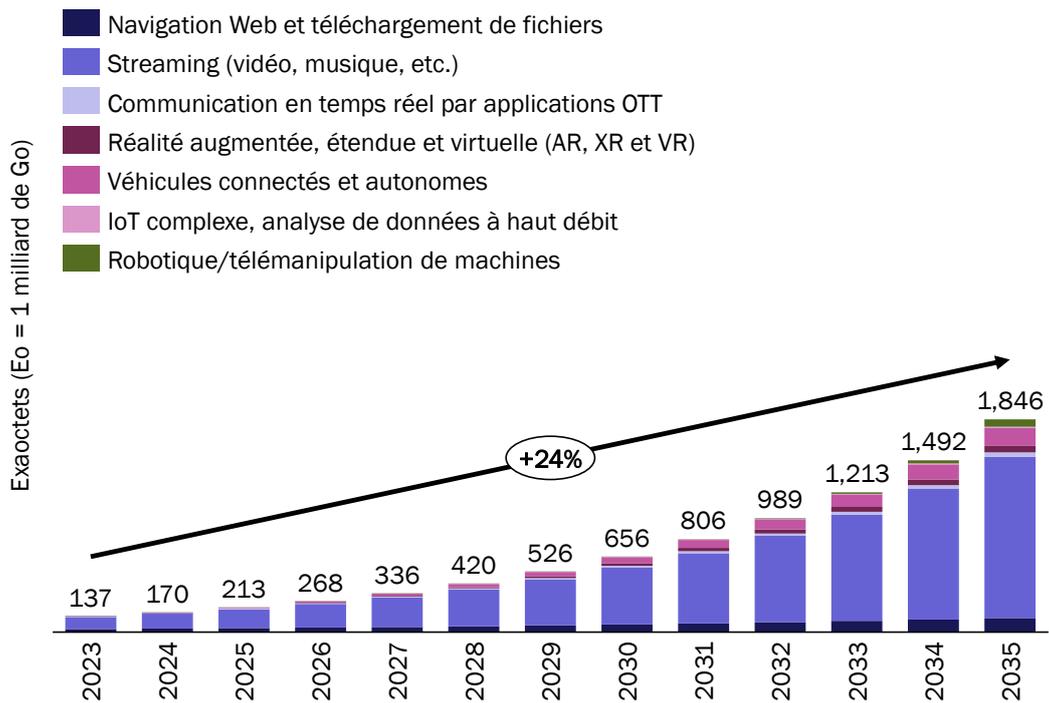


Figure 3 - Trafic par cas d'usage dans le scénario « numérisation accrue » [Source : Analysys Mason, 2025]

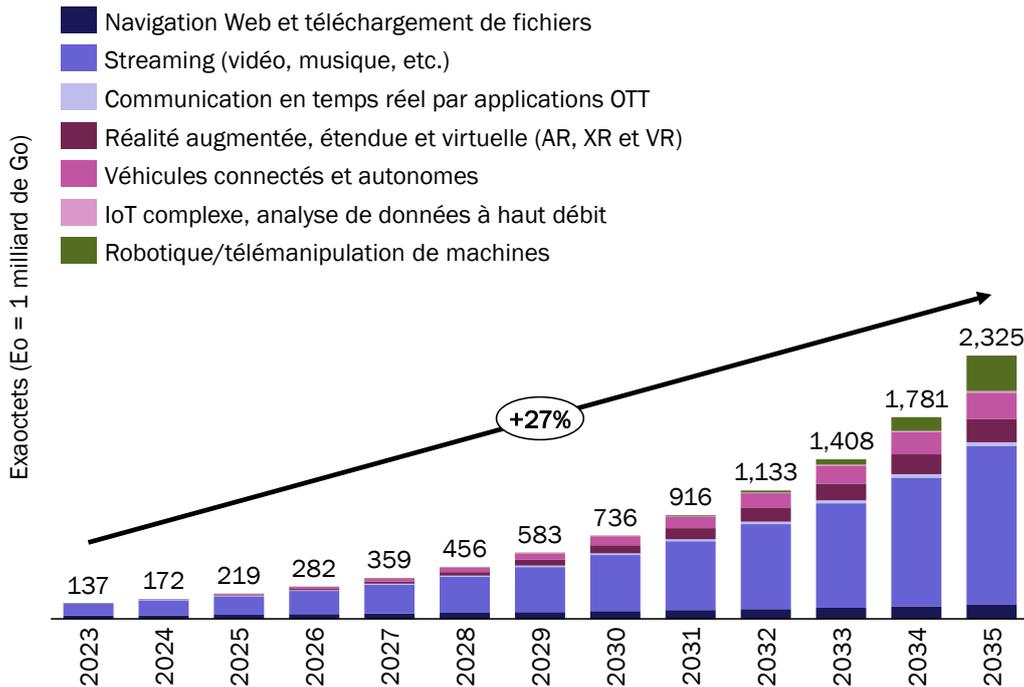


Figure 4 - Trafic par cas d'usage dans le scénario « numérisation accrue » [Source : Analysys Mason, 2025]

2.2 Volet 2 : dimensionnement des réseaux sans fil

2.2.1 Périmètre des réseaux sans fil et scénarios d'évolution des réseaux

a) Périmètre des réseaux sans fil considérés dans l'étude

Les besoins en dimensionnement des réseaux sont simulés en prenant en compte plusieurs types de réseaux sans fil :

- Réseaux cellulaires (incluant les accès fixes via les réseaux cellulaires) : 4G, 5G (bande intermédiaire), 5G (bande intermédiaire – 3,5 GHz), 5G bande millimétrique)¹⁰,
- Réseaux Wi-Fi : Wi-Fi 4 (802.11n), Wi-Fi 5 (802.11ac), Wi-Fi 6 (802.11ax), Wi-Fi 7 (802.11be) et Wi-Fi 8 (802.11bn),
- Réseaux satellite¹¹ : LEO (orbite basse), GEO (orbite géostationnaire)¹².

¹⁰ La technologie 6G et ses performances sont en cours de spécification par les standards 3GPP, elle n'est pas prise en compte dans les résultats présentés dans cette note au vu de l'incertitude associées. Compte tenu des objectifs d'amélioration de l'efficacité spectrale qu'apporte la 6G par rapport aux technologies 4G et 5G, la non prise en compte de la 6G dans les simulations pourrait induire un risque de sous-estimation de la capacité des réseaux cellulaires modélisés à l'échéance du déploiement de cette technologie (entre 2030 et 2035 selon les anticipations de l'écosystème).

¹¹ Pour le dimensionnement des besoins capacitaire des réseaux satellitaires, l'étude adopte une approche basée sur la capacité agrégée des satellites GEO/non GEO et une projection de cette capacité à horizon de l'étude sur la base de l'expertise de Analysys Mason (par exemple : <https://www.analysismason.com/research/content/regional-forecasts-capacity-supply-demand-nsi040-nsi006/>)

¹² Comme pour la 6G, le D2D n'est pas pris en compte dans les résultats présentés dans cette note au vu de l'incertitude associées.

b) Scénarios d'évolution des réseaux sans fil :

Présentation des scénarii d'évolution des réseaux sans fil :

Les scénarios représentent une augmentation progressive de la capacité des réseaux à travers des évolutions de fréquences et/ou technologiques. Les scénarios présentés ci-dessous sont cumulatifs (par exemple le scénario D inclut les évolutions des scénarios A, B, C et D).

- **Scénario A « Maintien du patrimoine spectral actuel des opérateurs »** : Dans ce scénario, les opérateurs disposent de leur patrimoine spectral actuel et de la capacité correspondante.
- **Scénario B « Optimisation du patrimoine spectral actuel des opérateurs »** : Dans ce scénario, les opérateurs optimisent leur patrimoine spectral actuel, par le *refarming* et le *reshuffling* des bandes existantes.
- **Scénario C « Mutualisation accrue des réseaux et ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées »** : Dans ce scénario, les opérateurs ajoutent de la capacité par : (i) une mutualisation accrue des réseaux, avec un plus grand partage des supports mobiles existants et (ii) le déploiement des bandes de fréquences existantes sur les supports mobiles où elles ne sont pas encore déployées par aucun opérateur
- **Scénario D « Ajout de nouvelles bandes de fréquences excepté le haut de la bande 6 GHz »** : Dans ce scénario, les opérateurs ont accès et déploient de nouvelles bandes de fréquences, excepté le haut de la bande 6 GHz
- **Scénario E « Ajout de nouvelles bandes de fréquences incluant le haut de la bande 6 GHz »** : Dans ce scénario, les opérateurs ont également accès et déploient le haut de la bande 6 GHz. Dans ce scénario, il est fait l'hypothèse que les opérateurs ont accès à la totalité du haut de la bande 6 GHz (c'est-à-dire 700 Mhz de spectre).

Présentation des principaux scénarios étudiés et leurs variantes :

Les scénarios principaux et leurs variantes permettant de tester l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz sont présentés en Tableau 4.

Tableau 4 – Scénarios principaux et leurs variantes permettant de tester l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz [Source : Analysys Mason, 2025]

Cas de base	Cas avec ajout du haut de la bande 6 GHz	Résultat
Scénario A	Scénario « A+6 GHz » incluant le haut de la bande 6 GHz	Impact de la bande 6 GHz en l'absence de toute autre évolution des réseaux mobiles
Scénario B	Scénario « B+6 GHz » incluant le haut de la bande 6 GHz	Impact de la bande 6 GHz après le <i>refarming</i> et <i>reshuffling</i> des bandes existantes
Scénario C	Scénario « C+6 GHz » incluant le haut de la bande 6 GHz	Impact de la bande 6 GHz après le <i>refarming</i> et <i>reshuffling</i> des bandes existantes, une mutualisation accrue des réseaux et l'ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées
Scénario D	Scénario E équivalent à « D+6 GHz »	Impact de la bande 6 GHz lorsque toutes les autres évolutions des réseaux sont également mises en œuvre

Hypothèses sur la disponibilité et l’usage des bandes de fréquence pour les réseaux cellulaires :

Tableau 5 présente les hypothèses temporelles d’évolution des réseaux, qui sont activées ou non selon le scénario de réseaux sélectionné. Les années présentées ici, notamment l’utilisation d’une bande de fréquences par la 4G ou la 5G, sont celles du cas de base et sont paramétrables dans l’étude.

Tableau 5- Disponibilité et usage des bandes de fréquences [Source : Analysys Mason, 2025]

Refarming ou nouvelle bande	Bande	Date de début d’utilisation par la 4G	Date de début d’utilisation par la 5G	Durée de déploiement (en années)
Refarming des sites utilisant encore ces bandes en 2G/3G	900 MHz	Non refarmée	2025	3-6 ¹³
	1800 MHz	2025	Non refarmée	3
	2100 MHz	Non refarmée	2025	6
Refarming des sites 4G utilisant ces bandes	700 MHz	Non applicable	2030	3
	2100 MHz	Non applicable	2030	3
	2600 MHz	Non applicable	2030	3
Mutualisation accrue des réseaux	700 MHz	2025	2025	3
	800 MHz	2025	n/a	3
	1800 MHz	2025	n/a	3
	2100 MHz	2025	2025	3
	2600 MHz	2025	n/a	3
Ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées -	700 MHz	Non applicable	2025	3
	800 MHz	2025	Non applicable	3
	1800 MHz	2025	Non applicable	3
	2100 MHz	2025	Non applicable	3
	2600 MHz	2025	Non applicable	3
	3,5 GHz	Non applicable	2025	3
Nouvelle bande	1,4 GHz en SDL	Non utilisée	2028	3
	2,6 GHz en TDD	Non utilisée ¹⁴	Non utilisée	Non utilisée
	Bas de la bande 3,5 GHz	Non utilisée	2028	3
	Haut de la bande 3,5 GHz	Non utilisée ¹⁵	Non utilisée	Non utilisée

¹³ Trois ans pour les sites 2G et 6 ans pour les sites 3G.

¹⁴ L’Arcep prévoit d’allouer la bande 2,6 GHz en TDD aux « réseaux mobiles professionnels [qui] sont des réseaux locaux qui permettent de répondre aux besoins spécifiques de connectivité de certaines entreprises et organisations, aussi appelés « verticaux » typiquement dans les secteurs d’infrastructure. »

¹⁵ L’Arcep a indiqué récemment que « La bande 3,8 - 4,2 GHz est aujourd’hui utilisée – et a vocation à le rester – par les stations terriennes du service fixe par satellite (FSS), ces stations étant néanmoins déployées sur un nombre limité de

Refarming ou nouvelle bande	Bande	Date de début d'utilisation par la 4G	Date de début d'utilisation par la 5G	Durée de déploiement (en années)
	Haut de la bande 6 GHz	Non utilisée	2030	3
	26 GHz	Non utilisée	2030	3

Par ailleurs, l'étude considère des hypothèses sur les règles d'ingénierie des réseaux sans fil déployés, notamment le calendrier des évolutions MIMO pour chaque technologie cellulaire et par chaque type de fréquence (bande basse, bande intermédiaire et bande millimétrique).

En complément des scénarios principaux et leurs variantes (cf. plus haut), des analyses de sensibilité ont été testés visant à apprécier l'impact d'une bande de fréquence en particulier (ex. impact de l'usage/non usage de la bande millimétrique), l'impact de la boucle de rétroaction (ex. activation du rétroaction opérateurs et/ou usagers), l'impact carbone du volet 3 de l'étude (ex. amélioration de l'impact carbone embarqué ou amélioration de l'efficacité énergétique des équipements utilisés).

2.2.2 Principes méthodologiques de la « la matrice de passage »

Le modèle établit des hypothèses de répartition du volume estimé de trafic suscité par chacun des cas d'usage vers chacun des réseaux au travers d'une matrice de passage.

Cette matrice de passage a comme objectif de modéliser les interactions entre différentes technologies, cas d'usages, et géotypes, tout en intégrant l'évolution temporelle des comportements des usagers et des performances des réseaux, comme indiqué en Figure 5.

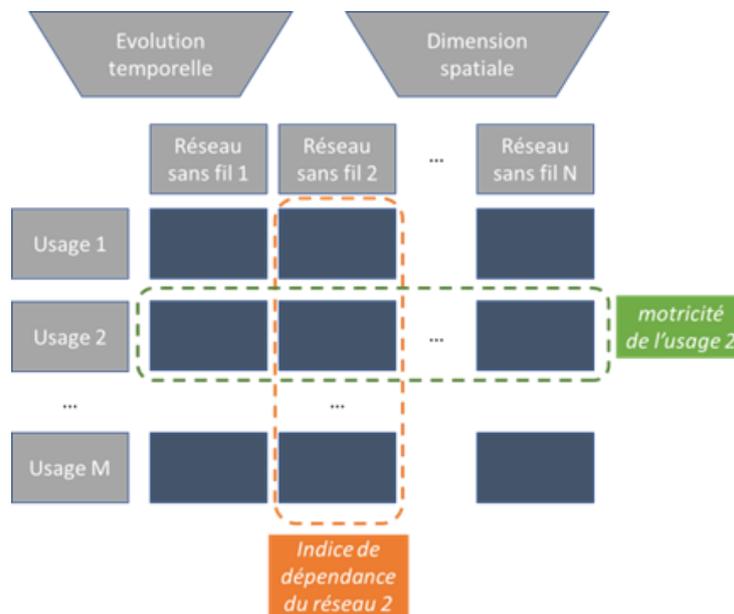


Figure 5 - Illustration du concept de la « matrice de passage » [Source : Arcep, 2024]

localisations sur le territoire national » et que « les travaux d'harmonisation à l'échelle européenne menés par la CEPT visent un usage en mode « TDD » et local. ». Les blocs compris entre 3,8 GHz et 4 GHz sont déjà ouverts aux usages expérimentaux.

Cette matrice de passage est élaborée à l'aide de la méthodologie exposée ci-dessous et représentées en Figure 6.

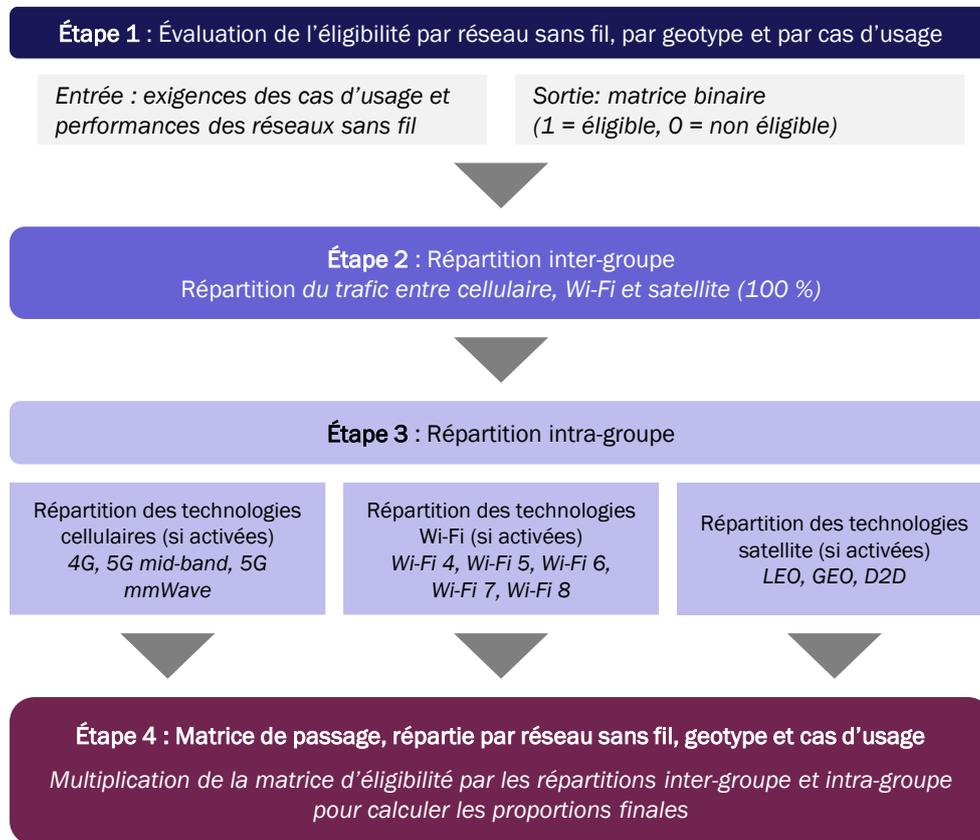


Figure 6 - Méthodologie du calcul de la matrice de passage [Source : Analysys Mason, 2024]

- **Étape 1 : Évaluation de l'éligibilité des technologies :**
 Tout d'abord, les exigences des cas d'usage sont comparées avec les caractéristiques de performance de différentes technologies sans fil, afin de déduire quelles technologies sans fil sont en mesure de répondre à chaque cas d'usage donné sur la base du débit montant (respectivement du débit descendant, de la latence, et de la gigue).
- **Étape 2 : Répartition inter-groupes :**
 Ensuite, pour chaque cas d'usage, une clé de répartition de la part du trafic entre groupe de technologies sans fil (c à d cellulaire, Wi-Fi et satellite) est estimée pour chaque géotype. Cette estimation évolue dans le temps et prend en compte :
 - les différences de couverture entre groupe de technologies sans fil pour identifier la part des réseaux satellite (notamment dans les zones les plus rurales) ;

- un facteur de déport¹⁶ est une hypothèse associée à chaque usage et prise en compte dans le calcul de la demande associée à chaque réseau avant l'application de la boucle de rétroaction (ex. passage au Wi-Fi depuis un réseau cellulaire lorsque les deux réseaux sont disponibles) pour identifier la part des réseaux Wi-Fi. Ce facteur peut varier par localisation du cas d'usage (« Principalement en intérieur », « En intérieur et extérieur » ou « En extérieur »), par géotype et par année. Les résultats qui sont présentés dans la partie 3 de ce document ont été établis en faisant l'hypothèse que le facteur de déport est fixe dans le temps.
- *Étape 3 : Répartition intra-groupe :*
Ensuite, une analyse supplémentaire est effectuée pour déterminer au sein de chaque groupe la part de trafic attribuée à chaque technologie spécifique.
 - *Étape 4 : Combinaison des étapes précédentes :*
Enfin, les résultats obtenus aux étapes précédentes sont combinés afin de générer une matrice de passage qui estime la distribution du trafic pour chaque cas d'usage, en fonction des géotypes et des technologies disponibles, par année.

2.2.3 Principes méthodologiques de la « Boucle de rétroaction »

L'étude considère deux mécanismes de rétroaction entre le dimensionnement des infrastructures réseaux sans fil d'une part et l'évolution des usages sans fil d'autre part :

- **une rétroaction entre la capacité disponible sur les réseaux et l'incitation des utilisateurs à accroître leurs usages, reflétant le choix d'un opérateur** d'offrir une plus grande quantité de données à ses abonnés mobiles s'il a de la capacité disponible sur ses réseaux (par exemple, pour gagner des parts de marché ou ne pas en perdre) ;
- **une rétroaction entre le niveau de saturation de chacun des réseaux et la répartition de la demande entre les réseaux, reflétant le comportement de l'usager final**, par exemple de forcer son terminal à se connecter au Wi-Fi plutôt qu'à un réseau mobile (ou vice-versa) si la qualité de l'un des réseaux n'est pas satisfaisante (ex. réseau saturé).

Ces deux mécanismes de rétroaction sont respectivement modélisés selon l'approche suivante :

- Les prévisions de trafic en année N+1 sont augmentées en fonction du niveau d'utilisation du réseau en année N. Par exemple, si le réseau est utilisé à 60 % et l'utilisation maximale est de 80 %, au niveau national, le trafic en année N+1 est augmenté au maximum de 33,3 % ($= (80\% - 60\%) / 60\%$). Cette augmentation a lieu après l'application de la matrice de passage.
- Le volume de trafic sur un réseau à l'année N+1 est modifié en fonction du niveau d'utilisation de ce réseau en année N, dans un géotype donné. Ainsi, si un réseau est saturé, plus de trafic est déporté vers un autre réseau sous-utilisé sans toutefois que l'utilisation de ce réseau ne dépasse son utilisation maximale.

La contribution spécifique de chacun de ces mécanismes de boucle de rétroaction dans l'estimation du trafic est prise en compte sans être distinguée dans les résultats présentés dans la partie 3.

2.3 Approches d'estimation du besoin en sites radios

Dans la suite de la note, l'étude utilise le terme de « site radio » et « site physique » comme suit :

¹⁶ Sur la base de l'expérience passée d'Analysys Mason, un facteur de déport de 80–85% est une estimation raisonnable. Cette hypothèse est cohérente avec les comparaisons effectuées à partir des données globales de trafic total, qui indiquent que la part des données transitant via le Wi-Fi se situerait entre 70% et 90 %.

- « **Site radio** » ou « **site mobile** » : il s'agit d'un point de présence pour un opérateur, quelle que soit la ou les technologies et bandes de fréquences déployées par cet opérateur à cet endroit. Si, par exemple, un opérateur « A » a déployé des équipements utilisant les technologies et fréquences 2G 900 MHz, 4G 800 MHz et 4G 2600 MHz à un emplacement donné, ceci correspond à un site radio. Si un opérateur « B » a déployé au même emplacement les technologies et fréquences 3G 900 MHz et 4G 2600 MHz, cela correspond à un deuxième site radio.
- « **Sites physique** » ou « **pylône** » : il s'agit d'un emplacement donné qui héberge des équipements pour un ou plusieurs sites radio. Les deux sites radio de l'opérateur « A » et l'opérateur « B » de l'exemple précédent correspondent à un seul site physique ou pylône. Par définition, il peut y avoir un maximum de quatre sites radio par site physique, si tous les opérateurs mobiles sont présents au même emplacement.

Dans tout ce qui suit, les résultats présentés sont exprimés en sites radio par opérateur et par an.

Pour calculer le nombre de nouveaux sites radio requis pour satisfaire le besoin en capacité, il est nécessaire de déterminer leur capacité unitaire, en fonction des bandes de fréquences qui y sont déployées. Deux approches ont été adoptées pour les bandes de fréquences déjà déployées par les opérateurs, tel que présenté en Tableau 6 :

- La première approche – plus optimiste – se réfère à la situation dans laquelle un opérateur déploie de nouveaux sites avec la capacité maximale possible afin de minimiser le nombre de sites.
- La seconde approche – plus conservatrice – se réfère à la situation dans laquelle un opérateur déploie de nouveaux sites avec la capacité moyenne des sites existants ; cette approche est moins efficace mais potentiellement plus réaliste à court terme car reflétant les contraintes des opérateurs.

Tableau 6 - Exemple de calcul de capacité illustrant les deux approches de dimensionnement des nouveaux sites radio

[Source : Analysys Mason, 2025]

	Nombre de sites radio existants (#)	Capacité par site radio pour chaque technologie (Mbit/s)	Capacité par nouveau site radio	
			dont la capacité est supérieure à celle d'un site existant (Mbit/s), pour les bandes existantes (1 ^{ère} approche)	dont la capacité est égale à celle d'un site existant (Mbit/s) pour les bandes existantes (2 ^{ème} approche)
Sites radio avec 4G	1000	40		
Sites radio avec 5G	500	100		
Nouveaux sites radio			140 = 40 + 100	90 = $\frac{1000 \times 40 + 500 \times 100}{1500}$

2.4 Volet 3 : évaluation de l'impact carbone des réseaux sans fil

L'empreinte carbone d'une activité peut être classée en trois catégories ou « Scope », conformément au « GHG Protocol »¹⁷, un cadre de référence mondial pour la mesure et la gestion des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle organisationnelle.

Tableau 7 – Scopes du Bilan carbone [Source : Bpifrance¹⁸, 2024]

Catégorie	Définition
Scope 1	Correspond aux émissions de GES provenant d'activités directement sous le contrôle de l'entreprise (notamment la combustion de carburant sur site).
Scope 2	Couvre les émissions de GES indirectes associées à la consommation d'énergie (notamment la consommation d'électricité et le chauffage).
Scope 3	Inclut les émissions de GES indirectes échappant au contrôle direct de l'entreprise, incluant les activités en amont et en aval de la chaîne de valeur de l'entreprise.

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre une approche d'évaluation carbone à base d'analyse par cycle de vie attributive, et considérerons :

- les réseaux sans fil (cellulaires¹⁹, Wi-Fi²⁰ et satellites) et les terminaux qui les utilisent²¹, mais pas les centres de données ;
- les GES embarqués (extraction et production des équipements, fin de vie, c.-à-d. Scope 3), approximés avec l'impact de production de l'équipement (fin de vie négligeable) ;
- les GES opérationnels (usage, maintenance et installation des actifs, c.-à-d. Scope 1 et Scope 2 et potentiellement des éléments du Scope 3 si une partie de ces activités sont délocalisées), approximés avec l'impact d'usage effectif (consommation d'énergie).

Le mix énergétique a été calculé à partir des données du gouvernement français²² et de RTE.²³

Tableau 8 ci-dessous présente une estimation du mix et des intensités carbone associées.

Tableau 8 - Production énergétique en France [Source : GIEC/IPCC, 2018, Ministère de l'Écologie, 2024, et RTE, 2022]

Source d'énergie	kgCO ₂ e/kWh ²⁴	Part en 2023 (%) ²⁵	Part en 2030 (%) ²⁶	Part en 2040 (%) ²⁶
Nucléaire	0,0120	63,4	60,1	45,0
Renouvelable	0,0195	26,8	34,8	53,8
Thermique à combustibles fossiles	~0,6500	9,7	5,1	1,0

¹⁷ <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

¹⁸ <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/scope-1-2-et-3-du-bilan-carbone-definition-perimetres-exemples>

¹⁹ La modélisation de l'impact carbone des réseaux cellulaires considère séparément l'impact d'un nouveau site physique (c.-à-d. un nouveau pylône) ou d'un nouveau site radio (c.-à-d. un nouvel équipement radio).

²⁰ Ce qui inclut les box Wi-Fi, mais pas la collecte filaire (ex. : PON FTTx).

²¹ Téléphones mobiles (smartphones), ordinateurs portables (personnels et professionnels), écrans d'ordinateur, téléviseurs, tablettes, casques HR/VR (LCD et OLED) et modules IoT.

²² Mix énergétique en 2023 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2024>

²³ Mix énergétique en 2030 et 2040, « Scénario N1 – référence » : https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-06/FE2050%20Rapport%20complet_ANNEXES.pdf

²⁴ Table A.III.2 in Annex III à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

²⁵ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2024>

²⁶ Scénario N1 – référence à : https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-06/FE2050%20Rapport%20complet_ANNEXES.pdf

Source d'énergie	kgCO ₂ e/kWh ²⁴	Part en 2023 (%) ²⁵	Part en 2030 (%) ²⁶	Part en 2040 (%) ²⁶
Autre	<i>Indisponible</i>	0,1	0,1	0,1
Moyenne pondérée	<i>Sans objet</i>	0,076	0,047	0,022

3 Résultats et principaux enseignements

Les résultats des scénarios principaux de l'étude présentés dans la suite se réfèrent à la première approche de dimensionnement des sites radio (c à d, à la situation dans laquelle un opérateur déploie de nouveaux sites avec la capacité maximale possible afin de minimiser le nombre de sites). La situation de départ correspond aux sites radios déployés par les opérateurs en 2024.

3.1 Résultats des scénarios principaux

3.1.1 Scénario A « Maintien du patrimoine spectral actuel des opérateurs mobiles »

Tableau 9 présente l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario de réseaux A et pour chacun des quatre scénarios d'évolution de la demande.

Tableau 9 - Impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario A [Source : Analysys Mason, 2025]

Scénario de demande	Scénario de réseaux A		Scénario de réseaux A+6 GHz incluant le haut de la bande 6 GHz	
	Nouveaux sites requis par opérateur et par an ²⁷	Empreinte carbone cumulée ²⁸ (en MtCO ₂ e)	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée
Sobriété des usages	3	140,53	-	140,49
Médian	1417	152,78	190	146,71
Numérisation accrue	4987	174,19	1444	156,18
Usages disruptifs	6278	181,50	2284	161,36

Dans le scénario de réseaux A « Maintien du patrimoine spectral actuel des opérateurs » :

- Le nombre de sites supplémentaires requis d'ici 2035 devient important à très important à partir du scénario de demande « Numérisation accrue » avec ou sans le haut de la bande 6 GHz.

²⁷ Ici comme dans tous les autres tableaux de résultats de ce document, « sites » est utilisé au sens de « sites radio », et les valeurs correspondent au nombre moyen de sites par opérateur et par an sur la période 2025-2035.

Chacun des quatre opérateurs mobiles français déploie en moyenne environ 1000 nouveaux sites radio par an (entre 800 et 1200). Ces nouveaux sites radio peuvent être déployés sur un « sites physique » ou « pylône » sur lequel un autre opérateur est déjà présent.

²⁸ Cumul des émissions carbone entre 2023 et 2035 incluant à la fois les actifs réseaux et les terminaux. Il est à noter que les terminaux représentent la majorité des émissions carbone (plus de 85 % dans tous les scénarios modélisés).

- Les autres stratégies d'évolution des réseaux (*refarming*, mutualisation, etc.) pouvant aider à absorber l'augmentation du trafic, et ainsi réduire le nombre de sites supplémentaires requis, seraient donc nécessaires.
- Le haut de la bande 6 GHz offre une réduction très significative du nombre de sites supplémentaires requis, allant de -51 % à -100 % selon le scénario de demande.

3.1.2 Scénario B « Optimisation du patrimoine spectral actuel des opérateurs »

Tableau 10 présente l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario de réseaux B et pour chacun des quatre scénarios d'évolution de la demande.

Tableau 10 - Impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario B [Source : Analysys Mason, 2025]

Scénario de demande	Scénario de réseaux B		Scénario de réseaux B+6 GHz incluant le haut de la bande 6 GHz	
	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée (en MtCO _{2e})	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée
Sobriété des usages	1	140,75	-	140,72
Médian	1308	152,26	181	146,82
Numérisation accrue	4724	172,63	1 325	155,50
Usages disruptifs	5960	179,55	2 000	159,51

Dans le scénario de réseaux B « Optimisation du patrimoine spectral actuel des opérateurs », les résultats sont proches de ceux du scénario de réseaux A, car le *refarming* vers les technologies 4G/5G des bandes 900 MHz, 1800 MHz et 2100 MHz utilisées en 2G/3G, ainsi que le *refarming* vers la technologie 5G des bandes 700 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz utilisées en 4G, n'offrent qu'une capacité supplémentaire limitée.

3.1.3 Scénario C « Mutualisation accrue des réseaux et ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées »

Tableau 11 présente l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario de réseaux C et pour chacun des quatre scénarios d'évolution de la demande.

Tableau 11 - Impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario C [Source : Analysys Mason, 2025]

Scénario de demande	Scénario de réseaux C		Scénario de réseaux C+6 GHz incluant le haut de la bande 6 GHz	
	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée (en MtCO _{2e})	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée
Sobriété des usages	-	142,49	-	142,49
Médian	129	147,53	35	147,27
Numérisation accrue	2314	156,47	1054	152,09

Scénario de demande	Scénario de réseaux C		Scénario de réseaux C+6 GHz incluant le haut de la bande 6 GHz	
	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée (en MtCO ₂ e)	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée
Usages disruptifs	3364	160,93	1800	155,00

Les résultats du scénario de réseaux C « Mutualisation accrue des réseaux et ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées » montre que ce scénario permet une réduction très significative du nombre de nouveaux sites requis pour satisfaire la demande par rapport au scénario de réseaux B.

Les résultats du scénario C permettent d'apprécier la part de nouveaux sites liés à la demande, qui ne sont pas une installation de sites sur les pylônes existants liée à la mutualisation ou à l'ajout du déploiement des bandes existantes là où elles ne sont pas encore déployées. Ce nombre de sites liés à la mutualisation et/ou l'ajout du déploiement des bandes existantes là où elles ne sont pas encore déployées n'est pas reflété dans le tableau ci-dessus, ni dans les autres tableaux de résultats basés sur les scénarios C, D ou E²⁹.

3.1.4 Scénario D « Ajout de nouvelles bandes de fréquence excepté le haut de la bande 6 GHz »

Tableau 12 présente l'impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario de réseaux D et pour chacun des quatre scénarios d'évolution de la demande.

Tableau 12 - Impact de l'allocation aux réseaux mobiles du haut de la bande 6 GHz pour le scénario D [Source : Analysys Mason, 2025]

Scénario de demande	Scénario de réseaux D		Scénario de réseaux E	
	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée (en MtCO ₂ e)	Nouveaux sites requis par opérateur et par an	Empreinte carbone cumulée
Sobriété des usages	-	142,60	-	142,60
Médian	64	147,45	11	147,33
Numérisation accrue	1297	153,27	733	151,11
Usages disruptifs	1927	156,00	1188	153,06

La comparaison entre les scénarios D et E représente l'estimation la plus conservatrice de l'impact du déploiement du haut de la bande 6 GHz de tous les scénarios. Le nombre de sites supplémentaires reste élevé dans le scénario de demande « Usages disruptifs » mais l'impact cumulé du *refarming*, de la mutualisation accrue, de l'ajout du déploiement des bandes existantes où elles ne sont pas encore déployées, de l'ajout de nouvelles bandes, et de l'ajout du haut de la bande 6 GHz a réduit le nombre de

²⁹ Cet ajout de sites radios correspond à une évolution programmée dans le cadre du scénario C. Ainsi le résultat du scénario C fait référence à un nombre de sites radio supplémentaires requis (non programmés) pour satisfaire la demande en sus des évolutions programmées dans le cadre de ce scénario. Ces évolutions programmées correspondraient à un ajout de 2133 sites par opérateur et par an d'ici 2035.

sites nécessaires par opérateur et par an d'ici 2035 d'environ 40% pour les scénarios « numérisation accrue » et « usages disruptifs », soit un effort de densification requis entre 733 sites et 1188 sites par opérateur et par an d'ici 2035 pour ces deux scénarios d'évolution de la demande.

3.2 Enseignements et limites de l'étude

Sur la base des résultats du modèle, plusieurs enseignements peuvent être déduits pour apprécier et qualifier la magnitude du besoin en capacité réseau supplémentaire des réseaux sans fils (et en particulier les réseaux cellulaires) en fonction des différents scénarios de l'évolution de la demande :

Dans le scénario de demande de « sobriété des usages » :

- L'impact du haut de la bande 6 GHz sur les réseaux mobiles est faible, voire nul, car le nombre de sites supplémentaires requis est très faible (au maximum trois sites mobiles par opérateur et par an), voire nul, quel que soit le scénario de réseaux ;
- Les réseaux Wi-Fi ne requièrent pas de points d'accès supplémentaires en l'absence du haut de la bande 6 GHz.

Pour les trois autres scénarios d'évolution de la demande, l'impact du haut de la bande 6 GHz sur les réseaux mobiles varie de faible à très significatif, en permettant d'économiser de 53 (pour le scénario d'évolution de la demande « médian » et pour le scénario D) à près de 4000 (pour le scénario d'évolution de la demande « usages disruptifs » et pour le scénario A) sites mobiles supplémentaires par opérateur et par an d'ici 2035.

Concernant l'impact carbone de l'attribution aux opérateurs mobiles du haut de la bande 6 GHz, les résultats indiquent en général une réduction de l'impact carbone à chaque scénario d'évolution des réseaux, en particulier pour les scénarios d'évolution les plus intensives de la demande (ex. « numérisation accrue », « usages disruptifs ») ; ces résultats montrent également que les terminaux représentent la majorité des émissions carbone (plus de 85 % dans tous les scénarios modélisés).

Par ailleurs, bien que les enseignements explicités plus haut permettent de dégager des tendances sur les besoins en capacité supplémentaire et d'apprécier le risque de congestion sur les réseaux en fonction de différents scénarios d'évolution de la demande, l'étude comprend un certain nombre de limitations et incertitudes. Dans la mesure du possible, certaines de ces limitations/incertitudes ont été appréciées via des analyses de sensibilité en tenant compte des points d'originalité de l'étude. Les principales limitations concernent notamment :

- La modélisation du Wi-Fi est faite de façon simplifiée : les risques d'interférences avec les autres points d'accès proches (tels que ceux des voisins dans un immeuble d'habitation) ne sont pas pris en compte, et chaque point d'accès bénéficie de la capacité unitaire maximale liée à sa génération (Wi-Fi 4 à Wi-Fi 8).
- Le nombre de nouveaux sites supplémentaires requis est uniquement lié à la capacité supplémentaire requise et à la capacité unitaire offerte par chaque nouveau site, et ne prend pas en compte les limites de densification cellulaire (interférence inter-cellulaire, limites opérationnelles, etc.).
- Les diverses sources utilisées pour établir les projections de demande ne distinguant pas la demande associée aux réseaux cellulaires publics (ceux modélisés) de la demande associée aux réseaux cellulaires privés, il est possible que la demande privée soit incluse dans le modèle alors qu'elle ne devrait pas l'être. Cet effet est faible, la demande associée aux réseaux cellulaires privés étant nettement plus faible que celle associée aux réseaux cellulaires publics. De plus, les différences entre les divers scénarios de demande sont bien plus importantes que les potentielles différences dues à l'inclusion ou non de la demande associée aux réseaux cellulaires privés.
- Comme pour toutes les prévisions de demande, il existe des incertitudes inhérentes aux données de projection de la demande pour chaque cas d'usage. Les évolutions liées à l'intelligence artificielle (IA) et son adoption par les usagers – notamment son impact sur la proportion du trafic dans le sens montant par rapport au sens descendant – pourraient également influencer sur les prévisions de demande.

- La matrice de passage repose sur l'utilisation d'une valeur unique pour chacune des différentes exigences (vitesse descendante, vitesse montante, latence) de chaque cas d'usage, ainsi que pour les caractéristiques de performance de chacune des technologies sans fil pour ces mêmes indicateurs, ce qui est une simplification de la possibilité pour chaque technologie sans fil de servir ou non un cas d'usage. Néanmoins, la sensibilité sur ces paramètres de la matrice de passage ne conduit qu'à des différences minimales pour les résultats du modèle.
- Au sujet de l'impact carbone, il existe des incertitudes associées aux données unitaires (données d'émission du carbone embarqué, consommation énergétique). De plus, les centres de données ne sont pas pris en compte dans l'impact carbone, et l'approche d'évaluation carbone de chaque scénario ne prend pas en compte les impacts selon une analyse du cycle de vie (ACV) conséquente.