

# Réponses à la consultation publique ARCEP

## Préparer le futur des réseaux

Inria

Septembre 2022

Ce document synthétise l'ensemble des contributions remontées par les membres des équipes-projets Inria sur la consultation de l'ARCEP relative au futur des réseaux. La liste des équipes ayant participé au questionnaire est la suivante :

- AGORA (responsable Hervé Rivano)
- ERMINE (responsable Bruno Tuffin)
- FUN (responsable Nathalie Mitton)
- MARACAS (responsable Jean-Marie Gorce)
- RESIST (responsable Isabelle Chrisment)
- TRIBE (responsable Aline Viana)

## 1 Favoriser l'innovation grâce à la 5G et ses évolutions

### 1.2 La 5G : une innovation de rupture qui continue d'évoluer vers la 6G

**Question 1.** *Quelles sont les évolutions les plus pertinentes apportées par les Release 16 et Release 17 de la 5G ? A quelles échéances ces évolutions seront-elles disponibles dans les réseaux et les terminaux ? Le cas échéant, quels besoins nouveaux en fréquences ces évolutions vont-elles susciter ?*

Les évolutions apportées par ces nouvelles releases incluent l'utilisation d'autres bandes de fréquences, ce qui peut permettre d'étendre couverture, capacité, latence... Certaines évolutions permettent des MiMO encore plus efficaces, notamment grâce à une meilleure gestion du diagramme de rayonnement de l'antenne. La Release 16 introduit le concept d'intégration de l'accès et du backhaul (IAB), qui est essentiel dans le déploiement rapide de stations de base, car il permet de remplacer le backhaul filaire (généralement en fibre optique), par un lien radio. Cette fonctionnalité peut nécessiter des fréquences supplémentaires, pour la mise en place du backhaul radio.

Les Release 16 et 17 proposent des nouveaux mécanismes réseau pour améliorer l'efficacité énergétique de l'UE (*User Equipment*), notamment par la standardisation d'un signal radio de réveil (*wake-up radio*) et la réduction des mesures de qualité du lien radio effectuées par des UEs avec une faible mobilité. La Release 16 améliore le fonctionnement de l'UE dans un mode de double connectivité, où le terminal mobile est connecté en même temps à deux gNodeB. Une bonne gestion des ressources radio peut réduire les fréquences radio nécessaires pour un déploiement donné.

Les Release 16 et 17 mettent les bases des réseaux non publics (NPN) qui offrent des déploiements limités à des utilisateurs spécifiques, par exemple dans une usine ou dans une centrale nucléaire, et sur des fréquences spécifiques. La Release 17 décrit des mécanismes de découverte des serveurs applicatifs dans un environnement *edge computing* et définit des évolutions architecturales pour l'intégration de l'analyse des données au sein du réseau mobile, ce qui ouvre la porte à des nouvelles solutions réseau basées sur de l'apprentissage automatique.

Alors que la version 15 a introduit le concept de réseaux non terrestres (NTN) dans la 5G par le biais d'une étude générale, les versions 16 et 17 sont les spécifications qui incluent formellement les satellites LEO et GEO, ainsi que les véhicules aériens sans pilote (UAV) et les plates-formes à haute altitude (HAP) en tant qu'éléments de réseau agissant soit comme liaison de retour du réseau central, soit comme station de base en orbite pour étendre la couverture, améliorer la fiabilité et maximiser la disponibilité. Bien qu'il s'agisse de caractéristiques de réseau pertinentes dans le contexte de la 5G, nous pensons que le délai de mise sur le marché peut être assez long en raison de la lenteur de l'industrie spatiale par rapport aux réseaux mobiles terrestres. En outre, en termes de réglementation des fréquences, l'attribution d'un créneau de fréquence à l'échelle mondiale pour les communications mobiles par satellite reste une question ouverte au sein de la communauté.

**Question 2.** *Même question pour la Release 18 ("5G Advanced"), la 6G et le Wifi 7.*

La version 16 du 3GPP comprenait des études sur la transparence (le signal de la forme d'onde est reconstitué par la charge utile sans aucune modification) et régénérative (tout ou partie des fonctions de la station de base sont mises en œuvre). Le groupe de travail a décidé de s'intéresser à la normalisation de l'option de charge utile transparente et de ne pas normaliser l'option de charge utile régénérative dans la version 17, pour diverses raisons techniques. La normalisation de l'option de charge utile régénérative est envisagée pour la version 18 avec trois options de conception potentielles : 1) gNB complet à bord, 2) gNodeB unité centralisée (gNB-CU) au sol, 3) unité distribuée gNodeB (gNB-DU) à bord. Le défi de la mise en œuvre de ces caractéristiques gNB à bord va certainement pousser les charges utiles régénératives à devenir opérationnelles dans 5 ans ou plus.

Pour la release 18, et aussi Wifi et 6G, un aspect important est la flexibilité de la gestion du spectre, avec un partage downlink/uplink, plus élaboré (mixte de FDD/TDD dynamique).

Pour la 6G, le défi est de supporter les communications UAV, véhicules, robots, avec des contraintes URLLC extrêmes (latence et fiabilité). S'ajoute également la contrainte massive. Les protocoles classiques de signalisation ne sont pas adaptés. Il faut aller vers des protocoles sans pilote et des traitements très asymétriques : simplicité maximale des algorithmes côté embarqué, complexité plus grande (à base d'IA) du côté du traitement du réseau, dans un contexte Cloud RAN et Open RAN.

**Question 3.** *Identifiez-vous d'autres évolutions des technologies mobiles pour des usages spécifiques, qui pourraient susciter des besoins nouveaux en fréquences, par exemple les communications entre terminaux ou le broadcast/multicast ? Si oui, lesquelles et pour quels usages ?*

La future 5G supportera/proposera les communications de terminal à terminal sans nécessairement passer par l'infrastructure. Cela permettra d'augmenter la capacité du réseau mais soulèvera des questions de gestion d'interférences et de tarification nouvelles. Des communications entre terminaux, par exemple dans le cas des communications entre véhicules (terrestres ou aériens), pourraient ainsi avoir besoin de fréquences supplémentaires. Cependant, des fréquences sont déjà réservées actuellement en Europe pour les communications liées aux systèmes de transport intelligent.

La gestion du spectre segmenté par opérateur, par application, par technologie est très sous-optimale. Beaucoup de ressources sont perdues. Pour pousser la *softwarisation* jusqu'au bout, une gestion dynamique des ressources radio, avec un minimum de coordination, des décisions décentralisées, basées sur la mesure d'interférences, et des terminaux avec des radios flexibles, serait plus efficace.

### 1.3 Les évolutions d'architecture des réseaux mobiles

**Question 4.** *En tant qu'opérateur ou entreprise, dans quelle mesure prévoyez-vous d'intégrer ces architectures ouvertes dans votre stratégie de déploiement de réseau ? Plus particulièrement, dans quel cadre et pour quels besoins estimez-vous pertinente l'introduction du edge computing dans les réseaux mobiles ? Quels enjeux notamment en matière d'accès, de caractéristiques de déploiement et d'usages identifiez-vous ? Comment faudrait-il y répondre ?*

L'introduction du *edge computing* représente un des éléments importants pour la garantie de l'ultra-basse latence. Il y a besoin d'un espace de stockage/calcul de proximité afin d'éviter le délai imposé par les com-

munications avec les grands centres de données. Il faut pouvoir exploiter des données spatio-temporelles issues des réseaux en quasi-temps réel et qui sont nécessaires aux applications comme la chirurgie à distance, la réalité mixte (XR), les véhicules autonomes, les offres de services personnalisés, la gestion de crise/désastre/accident, les jumeaux numériques (IoT),...

Les principaux enjeux vont être de comprendre et d'anticiper d'où-et-quand vient/viendra la demande de ressources dans le réseau. Il conviendra de développer et d'exploiter des solutions de calcul à proximité de la demande de la ressource, comme les véhicules qui sont dotés de ressources de calcul de plus en plus puissantes. Il faudra aussi pouvoir coupler les besoins à des ressources mobiles déployables telles des drones ou robots. D'autres enjeux seront ainsi d'intégrer la quantification des ressources nécessaires et leur temps de déploiement dans les algorithmes de prédiction ; d'identifier des lieux "centraux" et associer l'identification des lieux de déploiement des ressources aux coûts de communications (directes et multi-sauts) pour les atteindre.

Pour répondre à ces enjeux devront être définies des solutions d'apprentissage, exploitation, décision (p. ex., anticipation de mouvement ou déport de tâches/données vers le *edge computing*). Il faudra être capable de répondre à des besoins quasi-temps réel ; exemple de données décrivant la mobilité des usagers (groupée ou pas) et/ou des véhicules. Il faudra aussi veiller à l'utilisation fiable de ces données sans impacter les solutions (p. ex. *federated learning*). L'exploitation et la prise de décision peuvent reposer sur des bases de données petites et insuffisantes pour des algorithmes d'apprentissage automatique (deep learning,...).

La définition et la vérification des politiques de sécurité doivent également être impérativement prises en compte dès la conception des services à déployer impliquant éventuellement plusieurs acteurs.

**Question 5.** *En quoi ces changements d'architecture appellent, le cas échéant, un changement dans la gestion de l'accès aux ressources fréquentielles (identité des titulaires d'autorisations de fréquences, quantités attribuées ...)*

Le déploiement des solutions basées sur le *slicing* aurait un impact majeur dans ce sens, puisque les titulaires des fréquences pourraient être différents des fournisseurs d'infrastructure.

**Question 6.** *En quoi ces changements d'architecture (notamment décentralisation et déport des fonctionnalités réseau, edge computing, Open RAN, ...), peuvent-ils être un frein ou une accélération à la mutualisation des réseaux ? Quels enjeux concurrentiels identifiez-vous ?*

Ces changements peuvent d'abord être vus comme une accélération à la mutualisation :

- pas d'interruption/de dégradation de services demandant une ultra-basse latence, un stockage/calcul de grande proximité avec des ressources disponibles et accessibles plus rapidement, une implémentation et une continuité du "quasi-temps réel" ;
- une exploitation plus fiable (du côté utilisateur et fournisseur de services) des données/calculs demandés (implémentation d'un apprentissage fédéré mutualisé) ;
- une extension de la couverture de la qualité du réseau et avec moins de barrières sociétales (meilleur service à la portée d'une population habitant dans les zones non-urbaines ou loin des centres villes, souvent moins privilégiée) ;
- un réseau plus équitable - principe du moindre privilège ;
- une décentralisation et un déport de fonctionnalités réseau ainsi que l'introduction de solutions *edge* qui vont permettre une plus grande persistance des services 5G avec l'évolution technologique, en facilitant notamment la mutualisation de certaines fonctions réseau.

Ces changements peuvent également présenter un frein à la mutualisation. En effet ils risquent de multiplier le nombre d'acteurs intervenant dans le réseau et donc rendre plus difficile le partage d'éléments communs. De plus la supervision de telles architectures se complexifie en n'offrant que des vues partielles au niveau notamment du *edge*.

**Question 7.** *Quelles conséquences pourraient avoir ces nouvelles architectures sur la sécurité des réseaux ? Le cas échéant, quelles mesures seraient nécessaires pour prendre en compte celle-ci ?*

Ces nouvelles architectures peuvent permettre (1) un accès plus fiable et équitable (du côté des utilisateurs, opérateurs, et des fournisseurs de services) aux données utilisées ; (2) une exploitation de proximité des données de nature distribuée (e.g. d'une population, de différents services ou opérateurs) ; (3) une garantie de la non-interruption ou non-dégradation de la qualité d'expérience et de service pour les utilisateurs et les applications sensibles.

Cependant, il y a des risques d'accès au MEC (*Multi-access Edge Computing*), et donc d'accès aux données sensibles des utilisateurs et aux calculs. Il y a aussi plus de lieux à sécuriser, plus d'équipements hétérogènes difficiles à maintenir, plus de complexité dans la gestion des attributions de fréquences et autres ressources de communication. La tarification est aussi plus complexe. L'acceptabilité est à travailler.

Les nouvelles architectures vont conduire à des infrastructures beaucoup plus décentralisées, très dynamiques et impliquant des acteurs qui peuvent être différents. Assurer la sécurité de bout en bout va être un véritable challenge. Les services de sécurité devront être réalisés par des fonctions de réseau elles-mêmes virtualisées (détection d'intrusion, mécanismes de pare-feux,...) qui vont devoir être chaînées pour mettre en oeuvre une politique de sécurité. Il faut pouvoir définir des mécanismes d'automatisation pour orchestrer et déployer ces fonctions de sécurité, notamment en cas de déport au niveau *edge*. La vérification du chaînage de ces fonctions est également un enjeu à adresser.

Les aspects juridiques doivent être également considérés car ils sont essentiels : droit et devoir des entités impliquées par l'exploitation et l'usage fédéré/mutualisé de ces architectures et données concernées.

## 1.4 Les usages et les besoins en fonctionnalités attendus

**Question 8.** *Quels autres usages et fonctionnalités attendus identifiez-vous ?*

Des nouvelles fonctionnalités des technologies mobiles, qui ne sont pas forcément liées aux communications, commencent à se démarquer. Il s'agit par exemple d'un service de localisation très précise, notamment *indoor*, et de services de *sensing* à base d'ondes RF.

Pour soutenir de nouvelles applications identifiées dans le contexte du jumeau numérique, il faudrait renforcer les interactions entre monde réel et virtuel. Ainsi le défi du JCAS (Joint Communication And Sensing), qui permet au signal radio de cumuler des tâches de communication et d'interaction (localisation, *sensing*, radar,...) est un sujet très important, qui peut s'appuyer sur les RIS (surfaces intelligentes), sur les tags passifs avec *backscattering*.

Comme usages, on peut également citer les systèmes de recommandation, les services plus personnalisés de tout type (smart home, smart santé/hôpital... ).

Au niveau sociétal, il est souhaité plus d'équité avec un accès de qualité à l'information, aux services et aux applications (avec une meilleure couverture mutualisée du réseau de bonne qualité) associée à une meilleure empreinte environnementale et une consommation d'énergie plus faible.

**Question 9.** *Quels marchés seraient visés par ces usages ? Avec quelles perspectives d'évolution et à quelle échéance ?*

Ces nouvelles fonctionnalités pourraient se traduire par des services grand public dans une période de 10 ans, notamment dans les domaines de l'e-santé, de la gestion de flottes, de la surveillance et de la protection (de biens et de personnes).

Parmi les principaux marchés, on peut mentionner les secteurs du tourisme, de la finance, de l'éducation, de la santé (chirurgie,...), de l'agriculture, du divertissement (réalité augmentée,...), de l'industrie (jumeaux numériques à utiliser tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un projet d'infrastructure, depuis la R&D et la production/construction jusqu'à la formation et la maintenance,...).

**Question 10.** *Parmi ces usages, certains d'entre eux sont-ils plus spécifiquement appelés à se développer dans un environnement fixe, à l'intérieur de bâtiments par exemple, ou bien en mobilité ? Le cas échéant,*

*pour quelles raisons ?*

La plupart des usages peuvent être appliqués dans des environnements fixes et mobiles. Par contre, les besoins de localisation sont plus importants aujourd'hui à l'intérieur des bâtiments, d'autres solutions étant déjà disponibles à l'extérieur.

**Question 11.** *Le cas échéant, quelles nouvelles technologies mobiles seraient nécessaires pour couvrir l'ensemble de ces usages ? Pour couvrir vos usages en tant qu'utilisateur ?*

Idéalement, ces usages seront intégrés dans les technologies cellulaires et RLAN existantes. Il faudrait également renforcer l'interaction avec l'environnement utilisant les technologies JCAS et la localisation : aide à l'orientation, détection de risque dans l'environnement,...

Les technologies mobiles pourront être amenées à développer les fonctionnalités suivantes :

- compréhension (analyse et apprentissage), modélisation et anticipation : (1) des comportements des utilisateurs (e.g. modélisation de la mobilité, du trafic, de l'intérêt du contenu demandé) ; (2) de leurs besoins et demandes en termes de ressources (i.e., applications, services, qualité de service (QoS) attendue et expérimentée (QoE)) ;
- MEC perceptive et réactive aux comportements, capable d'anticiper les décisions de gestion du réseau de manière flexible, dynamique et quasi-temps-réel ;
- des solutions flexibles, dynamiques et quasi-temps-réel de déport de stockage et calcul vers le MEC côté client et dans les devices des utilisateurs (pas uniquement dans le réseau) ;
- une collecte des données instantanée décrivant les comportements des utilisateurs, tout en respectant la vie privée de ces derniers et permettant d'avoir une vision globale du réseau pour une prise de décision adaptée à l'ensemble des usagers (solutions attendues avec l'apprentissage fédéré).

**Question 12.** *Quels nouveaux besoins en fréquences identifiez-vous pour répondre à ces usages avec les technologies existantes, et, le cas échéant, avec l'introduction de nouvelles technologies ? Pour quelles raisons (capacité, débit, couverture...) ?*

De nouvelles fréquences avec des propriétés adaptées à ces services seront probablement nécessaires. La localisation et le *sensing* ont des besoins spécifiques en termes de signal radio.

Les technologies THz ou VLC permettent des débits théoriques très grands mais une couverture assez faible. Les fréquences UHF sont appropriées pour la couverture mais n'offrent pas assez de bande passante pour garantir tous les usages. Il faut donc continuer de développer des réseaux avec un objectif de couverture, délestés du haut débit dans les zones critiques par de la couverture en très haute fréquence ou en relais sur d'autres technologies.

Il faut aussi pouvoir prendre en compte la co-existence de plusieurs qualités de service pour différentes applications pour une meilleure gestion de l'énergie dans les transmissions (ce qui inclut une meilleure gestion des collisions et interférences).

De manière générale, devront être considérées les questions du bilan énergétique de toutes les solutions envisagées, de leur impact global incluant la production, la distribution et le recyclage.

## 2. Des besoins spécifiques et émergents pour les acteurs verticaux

### 2.2 Innovation et développement économique

**Question 13.** *Quelles perspectives la 5G offre-t-elle au tissu économique et industriel français ? En quoi les évolutions prévues (latence réduite, nombre massif d'objets connectés, débit amélioré) peuvent-elles s'avérer nécessaires pour embrasser l'ensemble des usages envisagés par les utilisations professionnelles de cette technologie ? Quel marché ces évolutions représentent-elles ? Quels bénéfices économiques peut-on attendre de l'appropriation de ces nouveaux services par les verticaux en général, ou par votre secteur en particulier ?*

La 5G peut permettre la création de nouvelles perspectives dans tous les secteurs (tourisme, financier, éducation, santé...). Elle apporte des opportunités en termes de débits, mais surtout de nouveaux usages orientés vers les objets connectés. Le type de trafic associé aux objets communicants est très différent du trafic humain : paquets courts, contraintes de délais... La 5G arrive donc en support des industries nécessitant une communication d'objets au sens large (tracking, localisation, identification...) mais aussi monitoring de bâtiments, de la ville... Bien entendu l'augmentation régulière du trafic nécessite d'adapter les tuyaux au besoin (à moins de contraindre cette augmentation par un changement de modèle économique).

**Question 14.** *Quels pourraient être les besoins spécifiques de mise à disposition de ressources temporaires pour des occasions particulières (chantiers, événements ponctuels) ?*

Un des besoins serait le déploiement rapide (en moins de 2h) d'un réseau mobile fonctionnel dans des situations d'urgence, utilisable par des équipes d'intervention, mais aussi par le public concerné. Comme ressources temporaires, on peut citer la mutualisation de la couverture temporaire avec une flexibilité de gestion et une mise en place rapide ; une réservation/réallocation temporaire et anticipation des ressources dans les MECs de proximité ; un usage de la modélisation des comportements des usagers d'une région donnée pour la simulation anticipée des besoins/demandes temporaires potentielles.

**Question 15.** *Quels sont les besoins spécifiques des entités implantées dans plusieurs pays ? Identifiez-vous des besoins spécifiques aux très petites, petites ou moyennes entreprises (TPE et PME) ? Quels pourraient être les enjeux concernant les ressources fréquentielles qu'ils requièrent (quantité de fréquences, qualité de service associée, etc.) ?*

Les besoins en fréquences dépendent surtout des besoins de connectivité. Au delà de ce qui a été cité précédemment, certains pays ont avant tout besoin de couverture réseau pour un meilleur accès aux soins, à l'éducation et à des partages d'information pour une meilleure gestion de l'agriculture par exemple.

## 2.3 Différentes réponses techniques possibles

**Question 16.** *Pour quels usages et quels besoins le recours à chacun des trois types de réseaux listés supra semble-t-il être le plus pertinent ? Pour quelles raisons ? Quelles sont les exigences et prérequis afin que le recours à ces types de réseau puisse satisfaire ces besoins ? Quelles sont les bandes de fréquences qui permettraient le mieux de satisfaire ces besoins ? Quels sont les acteurs qui pourraient offrir ces solutions ?*

Les réseaux privés standalone donnent une indépendance et une autonomie importantes. Ils seront privilégiés par des grands acteurs verticaux (RTE, SNCF, EDF), qui ont les ressources humaines pour déployer et opérer ces réseaux. Les réseaux privés fournissent des services/usages qui demandent plus de sécurité/respect de la vie privée des opérations). On peut citer les usages médicaux, industriels, gouvernementaux. Ils sont réservés à des activités et secteurs comme la santé, l'énergie, le militaire, le bâtiment, la production mais aussi à la gestion et le stockage privé des utilisateurs (cloud personnels).

Les réseaux opérés donnent moins de flexibilité, mais leur coût sera plus bas. Ce sera une solution privilégiée pour des PME et TPE qui proposent des services spécifiques, sans un besoin d'indépendance d'un point de vue infrastructure. Les réseaux publics peuvent répondre aux besoins des secteurs de l'éducation (cours en réalité étendue,...), du transport, des *smart cities*.

Les réseaux hybrides concernent plus les secteurs liés au tourisme, au divertissement et au marché de l'immersion et de l'interactivité (smart-\* services, jeux en 3D, streaming vidéo...).

**Question 17.** *S'agissant des réseaux hybrides, pour quelles raisons le mix/la complémentarité entre les deux types de réseau pourrait-il être requis (résilience, complément de couverture, continuité d'accès au réseau ...) ? Quels seraient les schémas d'hybridation (distribution des éléments/des fonctionnalités entre réseau privé et réseau opéré) les mieux adaptés pour répondre aux besoins ou usages identifiés supra (par exemple accès sur le réseau public, cœur privé) ? Quel rôle joue l'accès aux fréquences dans ces différents schémas ?*

Une architecture hybride peut intéresser des grands acteurs verticaux dans une optique de réduction de coûts : utiliser une infrastructure publique dans des zones avec un fort déploiement d'infrastructure par les

opérateurs. Il ne faut plus raisonner en termes de strata (accès et cœur), mais en termes de fonctions réseau. La séparation se fera au niveau de ces fonctions, les plus sensibles (facturation, contrôle d'accès, sécurité) vont rester sur le réseau privé, alors que la gestion réseau (ressources radio, ressources de calcul, mobilité) sera pris en charge par le réseau public.

L'intérêt des réseaux hybrides est également la garantie d'une qualité de service continue entre edge-cœur du réseau (edge-cœur continuum). Ils offrent également une plus large couverture en termes d'utilisateurs mais aussi en termes de besoins.

## 2.4 Évolution de l'écosystème pour répondre aux besoins des verticaux

**Question 19.** *Partagez-vous cette analyse des tendances en matière d'intermédiation et en identifiez-vous d'autres ? Comment voyez-vous le développement de l'écosystème autour de ces différents modèles ? Quels sont les avantages et les inconvénients des différents modèles ?*

D'un côté, l'intermédiation via la *softwarization* semble relativement inéluctable. L'intermédiation peut en effet s'avérer utile ; on peut penser par exemple aux CDNs comme intermédiaires pour les fournisseurs de contenu, se chargeant pour eux d'atteindre les utilisateurs avec une qualité optimale (les petits acteurs n'ayant pas cette compétence). L'avantage de l'intermédiation est de fournir de la flexibilité.

Cependant elle présente également des risques. Le nouvel intermédiaire doit gagner de l'argent. Une trop grande libéralisation peut engendrer un risque de flambée des prix en cas de pénurie de ressources ; une régulation peut donc être nécessaire. Un autre risque concerne l'impact d'un nouvel intermédiaire qui pourrait être en porte-à-faux avec les principes de neutralité du réseau. Il est donc important d'avoir un modèle économique qui respecte les utilisateurs/demandeurs tout en garantissant la sécurité, neutralité, équité des services.

D'un autre côté, cette analyse en matière d'intermédiation peut sembler reposer sur une vision inversée du fonctionnement d'un réseau mobile, qui imagine qu'un acteur vertical achèterait de la capacité ou du spectre ; or, un acteur vertical ne sait pas opérer un réseau, pour tirer profit d'une capacité achetée. Il va chercher tout simplement un fournisseur pour un service donné (connectivité pour les appels voix dans une certaine zone, collecte de données capteurs dans une autre zone...), pas des fréquences. Le concept de *broker* de ressources peut paraître peu probable, au moins pas à ce niveau de l'architecture, en contact direct avec des clients verticaux. On peut imaginer une séparation des rôles d'opérateur réseau et fournisseur de service. Cela peut avoir du sens d'un point de vue technique et ouverture du marché, mais c'est peu probable compte tenu du rôle et du poids des opérateurs aujourd'hui.

**Question 20.** *Quels acteurs de l'écosystème sont les plus fondés à disposer d'autorisations d'utilisation des fréquences ? Pour quelles raisons ?*

Tout dépend de l'objectif fixé. On peut imaginer des *brokers* si on cherche l'efficacité économique, les fournisseurs d'accès pour les compétences réseau et l'histoire, ou le régulateur pour garantir l'équité. Techniquement, les fréquences peuvent être attribuées à tous les niveaux de cette architecture reposant sur des *slices*. Cependant, le spectre radio représente un coût majeur, ce qui laisse penser que les fréquences vont aller vers les fournisseurs de services, qui seront en contact direct avec les clients et qui auront du coup les revenus les plus importants dans ce modèle. Cela est plus pratique aussi pour l'État, qui contrôle les obligations des entités bénéficiant de fréquences, car c'est beaucoup plus simple de vérifier qu'un service est bien proposé aux utilisateurs finaux que de vérifier si des SLAs entre deux entités ont été respectés. Il faut noter cependant que l'attribution des fréquences aux fournisseurs de services n'est pas forcément le meilleur choix d'un point de vue technique, car cela complexifie la mutualisation des ressources radio et l'optimisation de leur usage.

### 3. Besoins sociétaux et obligations des autorisations d'utilisation de fréquences

#### 3.1 Couverture et qualité de service des réseaux ouverts au public

##### 3.1.1 Questions d'ordre général

**Question 21.** *Quels sont les services grand public et professionnels indispensables fournis par les réseaux mobiles (navigation web, appels voix, appels visio, courriels, messagerie instantanée, streaming...) ? Les utilisateurs rencontrent-ils des difficultés pour accéder à ces services, et le cas échéant, dans quels cas et à quelle occurrence (endroit particulier, rarement/souvent en zones rurales, rarement/souvent à l'intérieur des bâtiments, en mobilité, sur les axes de transport...) ?*

Il y a des difficultés d'accès en zone rurale montagnaise (ex : vallées, routes à flanc de montagne) qui doivent être encore réglées. Cependant, les zones rurales ne sont pas les seules concernées. Il y a en effet aussi des problèmes d'accès à l'intérieur des bâtiments (avec accès en mobilité ou pas) et également aussi par exemple dans certains endroits en Région Parisienne (e.g., campus de l'Ecole Polytechnique, plateau de Saclay, certaines communes comme Antony, Palaiseau...).

Une des difficultés d'accès au réseau vient dans la plupart des cas d'un nombre insuffisant de ressources (fréquences, ...) au vu de la population. Cela est donc lié à la bande de fréquence utilisée et au déploiement de l'opérateur. Une autre difficulté est associée à la mobilité de l'utilisateur et la qualité du *handover*.

Le manque de ressources radio est aussi souvent lié à une mauvaise stratégie de déport : par exemple utiliser un lien cellulaire, quand on est au travail ou à la maison avec un point d'accès réseau local n'est pas du tout efficace. Il faut privilégier ce qui est associé à la mobilité et délester le trafic vers des points de proximité (par exemple Wifi) sans action de l'utilisateur. L'utilisateur ne doit pas se poser la question de l'interface radio qu'il utilise, mais simplement utiliser un service, les réseaux d'accès ayant la capacité de router le trafic de façon optimale.

Dans le cas des réseaux non terrestres (NTN) par satellite, une série de services seront offerts aux secteurs de l'Internet des objets (IoT) à distance, tels que le transport (maritime, routier, ferroviaire, aérien), la logistique, le solaire, la récolte de pétrole et de gaz, les services publics, l'agriculture, la surveillance de l'environnement et l'exploitation minière, entre autres. À cette fin, des technologies telles que NB-IoT et eMTC font l'objet de travaux au sein du 3GPP pour faire partie de l'écosystème NTN. L'objectif est de spécifier le support de NB-IoT et eMTC sur le NTN avec la capacité GNSS dans l'UE comme hypothèse de travail pour les dispositifs NB-IoT et eMTC.

**Question 22.** *Quels sont les critères de performances clefs nécessaires pour évaluer la qualité des services mentionnés ? Avez-vous noté des évolutions de cette qualité ces dernières années ?*

Parmi les critères clés de performance pour évaluer la qualité d'un service, on peut citer la latence du service, un débit élevé et continu (sans dégradation, sans interruption) descendant et remontant; la qualité d'expérience de l'utilisateur, la fiabilité du service (constance), la consommation d'énergie, la gigue, confiance (niveau de sécurité, respect de la vie privée, fiabilité associée).

On ne constate pas vraiment d'évolution de cette qualité depuis les dernières années, car le problème d'accès décrit dans la question précédente persiste. Cependant, pour le trafic vers l'humain, les performances progressent avec des critères qui sont les mêmes. Par contre le développement de l'IoT et des objets communicants tend à imposer de nouvelles métriques, moins liées à la capacité mais plutôt à la latence et à la fiabilité.

**Question 23.** *Quels seraient les besoins, en distinguant le grand public et les usages professionnels, qui pourraient ne pas être satisfaits par la combinaison des obligations déjà existantes ? Identifiez-vous d'autres leviers pour garantir que les déploiements répondent à ces besoins ? Si oui, quelles en seraient les modalités les plus adéquates ?*

Il semble que dans les applications visées par les générations précédentes de téléphonie, le but était de couvrir majoritairement la population (et non pas le territoire). Avec les applications envisagées et



demandées pour la 5G, on se doit de couvrir le territoire et pas seulement la population ; par exemple pour des applications de réseaux véhiculaires (pour couvrir même les routes de campagne) ou d'agriculture.

### 3.1.2 Questions spécifiques à la couverture à l'intérieur des bâtiments

**Question 24.** *Quelles sont les évolutions attendues des usages à l'intérieur des bâtiments ? Pour répondre aux besoins, quelles seraient les solutions techniques et les modèles d'affaires (par exemple opérateur neutre) les plus appropriés ? quels types d'acteurs seraient susceptibles de les déployer ? Quels seraient les enjeux concurrentiels, techniques, réglementaires ou d'autre nature liés à ces solutions et modèles d'affaires ?*

Parmi les évolutions des usages on peut citer l'usage immersif et/ou interactif dans les secteurs de l'éducation, santé, industrie, construction/architecture, tourisme,... Comme déjà mentionné précédemment, la localisation *indoor* est également un élément important. Il s'agit aussi de détecter des services de proximité authentifiés. Pour cela il faut renforcer les interactions entre le téléphone et son environnement.

La notion d'opérateur est théoriquement intéressante, mais passe-t-elle à l'échelle face à la multiplication des cas rencontrés à l'intérieur des bâtiments ? Une mutualisation des petites cellules pourrait-elle être réalisée via des "incitations" financières (par exemple des taxes vertes sur les émissions qui inciteraient à partager les coûts) ? Il s'agit juste d'une éventualité à étudier, pas d'une recommandation.

Les modèles d'affaires pourraient s'articuler autour de la donnée générée dans le réseau et par le réseau, et ses acteurs : consommateurs de données, fournisseurs de données, places de marché, fournisseurs de services. L'utilisateur pourrait être inclus dans le modèle en tant que bénéficiaire. Les acteurs ont besoin de données pour mieux s'adapter aux conditions du réseau, aux besoins et demandes de ses utilisateurs. Dans ce contexte, l'accès aux données est essentiel et certaines données concernent l'utilisateur. Pourquoi ne pas permettre aux utilisateurs de participer à ce modèle en leur donnant le moyen de gérer cet accès (vente) à leurs données et en être bénéficiaire financièrement ?

Indépendamment des solutions et modèles d'affaires, un des enjeux techniques est garantir un service continu de bout-en-bout (du device au cœur de l'Internet, en passant par n'importe quel intermédiaire dans le réseau), sans dégradation de la qualité de service, fiable et équitable pour les utilisateurs et protecteur de la vie privée, ainsi que fiable et sûr pour les autres entités de la chaîne, comme les fournisseurs de services.

Des règles concurrentielles doivent être préalablement établies, claires et à la portée des utilisateurs. Actuellement, toute la chaîne existante entre l'utilisateur et les fournisseurs de services est floue pour l'utilisateur, ce qui limite son pouvoir de décision (e.g., exploitation de ses données réseaux ou monétisation de ses données).

**Question 25.** *Quelles fréquences supplémentaires pourraient permettre de répondre aux besoins de couverture et de qualité de service indoor, et de quelle manière ? En particulier : la bande 26 GHz est-elle adaptée pour des solutions ad hoc en indoor ? Les bandes 450 MHz et 1,4 GHz pourraient-elles permettre, vu leurs qualités de propagation, un gain de couverture en indoor via les réseaux mobiles ? Quelles autres fréquences pourraient être envisagées pour répondre à ce besoin de couverture ?*

La bande 450MHz assure une bonne couverture mais la bande passante est faible. Elle ne peut donc pas vraiment contribuer à une couverture haut débit, mais plutôt assurer une couverture pour des applications critiques. La bande 26GHz marche surtout en visibilité directe. Elle peut être améliorée avec du MIMO massif, qui permet de compenser en partie les pertes, ou avec des équipements de type RIS qui permettent d'augmenter la portée. Le modèle économique et même technologique des RIS reste à trouver.

**Question 26.** *Quel rôle joue le Wifi dans l'ensemble des solutions pour fournir des services à l'intérieur des bâtiments ? Le cas échéant, pour quels usages le Wifi n'est-il pas une technologie appropriée, et pour quelles raisons ?*

Sur le rôle du Wifi, les avis divergent. Certaines équipes soulignent l'importance du Wifi qui a un rôle essentiel et devrait être accessible gratuitement à tous, partout et n'importe quand : un accès à l'information équitable et accessible à tous à l'intérieur des bâtiments, dans des zones isolées, ou dans des transports souterrains. Le Wifi devrait avoir un rôle renforcé. En effet, utiliser un lien 4G pour échanger des données avec un mobile situé en intérieur (avec une liaison de centaines de mètres ou km) alors qu'un accès Wifi à proximité existe est une aberration. La multiplicité des points d'accès Wifi dans des immeubles résidentiels,

en compétition pour l'accès est également sous optimale. Le Wifi devrait être vu, pratiquement comme une infrastructure partagée secondaire pour assurer la couverture. Comme le Freewifi, il conviendrait de dissocier la notion d'abonnement de la notion de matériel.

Pour d'autres chercheurs, il n'y a aucune raison technique de privilégier l'usage du Wifi. Contrairement au ressenti des utilisateurs finaux, qui considèrent qu'une connexion Wifi est de "meilleure qualité" qu'une connexion cellulaire, le Wifi est une technologie moins performante et plus énergivore (mais bien plus simple à déployer) que le cellulaire, à nombre et densité d'utilisateurs constants. Le ressenti actuel est simplement lié à un déploiement hyper-dense et non régulé du Wifi.

### 3.1.3 Question sur l'accès fixe par les réseaux hertziens terrestres

**Question 27.** *Les dispositions existantes vous paraissent-elles satisfaisantes et suffisantes ? En particulier, pensez-vous nécessaire de prévoir des nouvelles dispositions pour assurer la généralisation du "très haut débit" ou permettre aux utilisateurs qui le souhaitent une redondance des réseaux filaires par des technologies hertziennes ? Avez-vous des propositions à faire ?*

Il semble que toutes les applications ne nécessitent pas du haut débit. Il serait mieux de réussir à proposer une connexion à plusieurs niveaux de QoS. Doubler le réseau filaire avec le hertzien semble être une redondance de réseau comme une autre. Il s'agirait plus de doubler le hertzien par le filaire (plus fiable). D'un point de vue énergétique, rayonnement et développement durable, si un réseau fixe existe il est préférable de l'utiliser. La question peut se poser dans un territoire où il n'y a pas de réseau fixe et qu'on déploie un réseau radio (exemple le développement du Wimax en Inde il y a quelques années). Par défaut, quand on est chez soi, on devrait router le trafic vers le point filaire le plus proche (si la QoS est suffisante débit/latence), par un système radio courte portée, et prendre le relais en hertzien quand on est loin d'un point d'accès, en mobilité... Outre l'efficacité du réseau, une telle approche réduirait la consommation des batteries.

## 3.2 Numérique soutenable

**Question 29.** *Avez-vous des propositions (leviers d'action, moyens, stratégies etc.) à partager en matière de gestion du spectre ou d'attribution de fréquences pour réduire l'impact environnemental des réseaux et plus généralement promouvoir un numérique soutenable ? Quelles exigences ou prérequis seraient nécessaires pour rendre opérant, le cas échéant, ce levier (disponibilité de données, cohérence méthodologique, contrôle/audit a posteriori etc.) ?*

Un moyen de réduire l'empreinte environnemental de nos réseaux serait déjà d'envoyer moins de données inutiles. Pour cela il y a plusieurs moyens (filtrer les données à la source, responsabiliser et sensibiliser les utilisateurs pour qu'ils utilisent d'autres moyens quand c'est possible, nettoyer les données stockées plus souvent) et pour les développeurs, adapter des méthodes de codage responsable. Il a été prouvé qu'un bon code réduit drastiquement la consommation des processeurs.

Les évolutions des réseaux contribuent à développer des usages et donc augmentent inévitablement l'empreinte énergétique. Malgré un gain d'efficacité énergétique énorme, l'augmentation du trafic conduit à une augmentation de l'impact. Une seule solution consiste à réduire le trafic, mais elle ne peut être que économique et/ou politique : forfaits mobiles remplacés par un paiement au volume, suppression des trafics inutiles (publicité notamment); régulation du le trafic (abandon de la neutralité du web ?). Il conviendrait peut-être de contraindre les opérateur sur une empreinte carbone, mais surtout pas sur une efficacité énergétique. Contraindre par le ratio Energie/bit est une erreur. Il faut contraindre sur le volume : obligation de réduire l'empreinte de x% par an.

## 3.3 Mutualisation

**Question 32.** *Comment les stratégies d'attributions de fréquences peuvent-elles contribuer à la mutualisation des infrastructures ? Au-delà du cadre existant, quelles sont les mesures spécifiques en matière de partage de réseaux mobiles pour les déploiements futurs qui pourraient être utiles ? Dans quelles bandes de fréquences et pour quelles raisons ?*

Il peut paraître paradoxal d'allouer des fréquences pour des montants financiers de plus en plus élevées et utiliser ces fréquences pour inciter à la mutualisation. Si on sort du modèle actuel, plusieurs leviers sont possibles, par exemple proposer des fréquences (avec des prix moins élevés) partagées entre opérateurs, ou entre clients verticaux.

La notion de partage dynamique des ressources serait une idée efficace. Il y a une littérature autour des "licensed shared access" (LSA) qui permet cela. Il faut sortir d'un partage statique. Peut-être faudrait-il aborder la question comme pour les voies ferrées : une infrastructure nationale fournissant les réseaux d'accès (structure publique ou déléguée au privé), et fournisseur de service exploitant l'infrastructure. Avoir 4 opérateurs 3G/4G/5G/6G, multiplie les infrastructures. redondance, manque d'efficacité spectrale...

**Question 33.** *Dans quel environnement (par exemple : indoor/outdoor, zone dense/moins dense, etc.) la mutualisation des petites cellules serait-elle la plus appropriée ? Pour quels gains ? Au contraire, dans quel environnement serait-elle la plus problématique ? Pour quelles raisons ? Quels sont les enjeux concurrentiels et/ou stratégiques liés à la mutualisation des petites cellules que vous identifiez*

La mutualisation de petites cellules a peu de sens, car leur zone de couverture est par définition réduite. Par contre, il est essentiel d'imposer une mutualisation du backhaul pour ces petites cellules. La superposition des accès Wifi dans les zones résidentielles est une aberration technologique. Globalement, c'est dans les zones denses que le partage du spectre entre opérateurs limite le plus l'optimisation des ressources.

## 4. Questions spécifiques par bande de fréquences

### 4.1 Partage des fréquences et attributions localisées

**Question 37.** *Le cas échéant, si ces bandes de fréquences voient coexister usage mobile et autres usages (satellite, lien fixe ...), quels modes de partage vous apparaissent pertinents ?*

Il serait pertinent de revenir sur les travaux d'il y a 10 ans relatifs à la radio cognitive avec réseau primaire et secondaire.

### 4.2 Les fréquences harmonisées au niveau européen qui pourrait faire l'objet d'une attribution à court terme

**Question 40.** *Quels impacts pourraient avoir respectivement ces niveaux de seuils sur les utilisations potentielles de la bande 1,4 GHz et les déploiements que vous pourriez envisager ?*

La bande 1,4GHz est intéressante pour les réseaux mobiles : très bon compromis pénétration/bande passante, même si la bande n'est que de 25MHz.

**Question 44.** *Quels sont les débits envisageables dans cette bande sans agrégation de porteuses ?*

Pour répondre à cette question, il faut évaluer la technologie déployée (MIMO ?), les services ciblés, la portée voulue.

**Question 50.** *Quels compléments à la couverture en très haut débit et notamment en fibre optique jusqu'à l'abonné (FttH) l'utilisation de la bande 1,4 GHz pour des services de 4G/5G fixe pourrait-elle apporter ?*

Peut-être la couverture du dernier mètre ?

## 5. Autres sujets éventuels

**Question 98.** *Au-delà de tous les sujets abordés dans les sections précédentes de cette consultation, quels autres enjeux relatifs à l'attribution de nouvelles fréquences pour les réseaux mobiles mériteraient d'être*

*portés à l'attention de l'Arcep ?*

L'ARCEP devrait mener une étude d'impact DDRS (Développement Durable et Responsabilité Sociétale) en :

- imposant une étude d'impact des technologies : bénéfice versus coût ;
- en limitant l'effet rebond par une reconsidération du modèle économique et politique qui tend à aller vers toujours plus de débit ;
- en analysant/étudiant et questionnant l'utilité des applications et services mobiles. Quelles sont les applications qui consomment ? Pour quelle utilité ?
- en évaluant quels sont les matériaux/ressources naturelles nécessaires pour chaque technologie.

L'ARCEP pourrait associer à la régulation des fréquences la régulation de l'impact DDRS de ces différentes technologies. Il faudrait proposer un modèle économique qui permette de soutenir les technologies qui répondent à des besoins d'usage clairement voulus par les citoyens.