

# Enjeux numériques



## Les 5G professionnelles

N°34 - JUIN 2026



Notre site



*Publiées avec le soutien  
de l'Institut Mines-Télécom*



## ENJEUX NUMÉRIQUES

ISSN 2781-1263 (en ligne)

ISSN 2607-9984 (imprimé)

Série trimestrielle - N°34 - Juin 2026

### Rédaction

Conseil général de l'Économie  
Ministère de l'Économie,  
des Finances  
et de la Souveraineté  
industrielle et numérique  
120, rue de Bercy  
Télédoc 797  
75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales-des-mines.org>

**Grégoire Postel-Vinay**  
Directeur de la publication  
et Rédacteur en chef

**Alexia Kappelman**  
Secrétaire générale

**Daniel Boula**  
Secrétaire général adjoint

**Magali Gimon**  
Assistante de rédaction  
et Maquettiste

**Nuria Gorris**  
Webmestre et Maquettiste

### Publication

**Photos de couverture**  
Mercure © 2005 Musée du Louvre,  
Dist. GrandPalaisRmn  
Pierre Philibert

**Iconographie**  
Daniel Boula

**Mise en page**  
Magali Gimon

**Impression**  
Duplirprint Mayenne

### Membres du Comité de rédaction

**Pierre Bonis**  
Co-président  
**Anne-Lise Thouroude**  
Co-présidente  
**Edmond Baranes**  
**Godefroy Beauvallet**  
**Côme Berbain**  
**Hélène Brisset**  
**Serge Catoire**  
**Nicolas Chagny**  
**Jean-Pierre Dardayrol**  
**Éric Freyssinet**  
**Frédéric Garcia**  
**Francis Jutand**  
**Arnaud de La Fortelle**  
**Caroline Leboucher**  
**Julien Nocetti**  
**Bertrand Pailhès**  
**Grégoire Postel-Vinay**  
**Maurice Ronai**  
**André Schwob**  
**Laurent Toutain**

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

# Les 5G professionnelles

04 **Préface**  
Philippe HERBERT

06 **Introduction**  
Xavier LAGRANGE et Laurent TOUTAIN

## LA STRATÉGIE DE DÉVELOPPEMENT DE LA 5G

08 **Stratégie nationale sur la 5G industrielle**  
Thomas ORAZIO

15 **L'Alliance 5G industrielle : un levier collectif  
pour accélérer le déploiement des réseaux 5G privés**  
Thomas HERVIEU

19 **La gestion du spectre pour les usages professionnels**  
Patrick LAGRANGE

24 **La 5G et la santé**  
Anne PERRIN

## TECHNOLOGIES ET ARCHITECTURES

35 **La 5G professionnelle : un outil de compétitivité  
pour l'industrie et les services critiques**  
Viktor ARVIDSSON

45 **Vers une cybersécurité comportementale  
des réseaux 5G privés industriels**  
Cédric THIÉNOT

50 **Les satellites en orbite très basse : la nouvelle frontière  
de la 5G professionnelle**  
Pierre POPINEAU

56 **Plateformes 5G : contributions des projets  
PEPR réseaux du futur et CMA IMTfor5G+**  
Philippe MARTINS et Xavier LAGRANGE

## CAS D'USAGE DE LA 5G

- 67 **Orange, l'opérateur des réseaux privés 5G**  
Charles-Henri MORIN et Nicolas CARRERE-DEBAT
- 71 **Le Réseau Radio du Futur (RRF) : la 5G au service  
des missions de sécurité et de secours**  
Guillaume LAMBERT
- 81 **Le haut débit mobile critique dans les Aéroports de Paris**  
François MUNEROT
- 93 **5G et défis du transport ferroviaire en Europe**  
Marion BERBINEAU
- 101 **La ville connectée et son évolution avec l'arrivée de la 5G**  
Norbert FRIANT
- 107 **La 5G comme cinquième fluide hospitalier :  
quand le réseau mobile devient un outil de soins**  
Sylvie CASSAUBA-TIRCAZOT et François DALLAY
- 115 **5G industrielle et IA : des complémentarités à exploiter**  
Pierre-Jean BENGHOZI
- 121 **On the road to 6G - Status of industry progress  
in a changed world**  
Ulrich DROPMANN

---

127 **Traductions des résumés**

133 **Biographies des auteurs**

*Ce numéro a été coordonné par  
Xavier LAGRANGE*

# Préface

**Par Philippe HERBERT**

Président de la Mission 5G industrielle 2021-2025

En octobre 2021, lorsque la Mission 5G industrielle a été lancée, il fallait d'abord réconcilier les industriels avec la 5G en leur expliquant de façon concrète pourquoi cette technologie était faite pour eux et par eux, et comment ils pourraient en bénéficier sur des cas d'usage identifiés ainsi que le lien direct avec l'industrie 4.0 et le futur de l'industrie.

Cette première étape a été accompagnée par la stratégie nationale du plan France Relance/France 2030 et par la stratégie d'accélération sur la 5G, ainsi que par l'Arcep, au travers de l'ouverture de l'accès à de nouvelles fréquences mais aussi par des évolutions très favorables concernant les coûts des redevances. Les enjeux de compétitivité et de souveraineté ont été identifiés très tôt par la puissance publique.

Dans ce contexte, les 28 plateformes d'expérimentation d'usage de la 5G (financement public de près de 100 M€) ont montré la voie, par la diversité des cas d'usage et des secteurs couverts (industrie, énergie, transports, santé, collectivités territoriales...), mais aussi par le travail en équipe (utilisateurs, opérateurs, fournisseurs et intégrateurs) que nécessite l'arrivée d'une nouvelle technologie dans un monde professionnel déjà très structuré.

Pendant près de quatre ans, la Mission 5G industrielle a accompagné, partagé les informations, les expérimentations et a porté la dynamique des premiers déploiements de la 5G industrielle. La création de lieux fédérateurs (Excelcar à Rennes et CETIM de Cluses notamment) a permis aux industriels et autres professionnels de prendre en main les technologies autour de la 5G et de se les approprier à partir d'exemples et de projets concrets en prise avec leurs activités.

Il a également pu être démontré, désormais que la 5G industrielle représente un déclencheur de nouvelles formes de création de valeur, en rendant possibles des processus qui, sans elle, ne peuvent pas être mis en œuvre à un coût acceptable par les marchés. À titre d'exemple : la ligne de production qui traditionnellement était fixe et linéaire, donc très coûteuse, chez les constructeurs automobiles est devenue, grâce au déploiement de réseaux 5G industrielle : flexible, mobile et adaptable aux différents modèles produits, sans oublier les interactions possibles en termes de sécurité (latence) et d'efficacité (couplage direct au jumeau numérique), entre les opérateurs, les robots et les machines (voir l'exemple de l'usine BMW à Debrecen, en Hongrie). Les gains de compétitivité et de capacité de production, à des coûts globalement diminués, liés à cet exemple, montrent la voie pour les grandes transformations de l'industrie.

Mi-2025, date de fin de la Mission, il m'est apparu que le foisonnement des cas d'usage chez les industriels pionniers, leurs résultats aussi bien en termes de capacité que de retours sur investissement, et la dynamique enclenchée devaient être relayés par l'ensemble de l'écosystème de la 5G industrielle.

C'est pourquoi l'association Alliance 5G industrielle a été lancée début juillet 2025 avec une quinzaine de membres fondateurs (industriels, fournisseurs, opérateurs, intégrateurs, écoles...), afin de continuer à informer, partager et échanger autour de la 5G et du socle technologique industriel. Les ministres du Numérique et de l'Industrie ainsi que la DGE ont tout de suite accordé leur soutien à cette initiative, nouvelle sur la forme. Aujourd'hui, forte de près de 35 membres (français ou européens pour incarner la souve-

raineté), l'association regroupe l'ensemble des 5G professionnelles, y compris celles que vous retrouverez dans ces annales, chacune avec ses cas d'usage propres.

Bien sûr, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir et d'autres technologies comme l'IA, la cybersécurité ou le *cloud*, ainsi que, de manière plus prospective, le quantique, concourent également à la refonte des processus, à l'amélioration des performances et de la compétitivité. Ces évolutions ne peuvent pas être traitées en silo. La 5G est un élément clé des nouvelles architectures en réseaux du *cloud*, dont les ressources sont de plus en plus disséminées, en dehors des grands *datacenters*, sur tout le paysage numérique, jusqu'au *far edge*, en passant par le *mobile edge computing*. L'IA devient de plus en plus distribuée, du fait de l'IA fédérative ou de l'IA agentique (par nature multi-agents) ; ici encore, la conception holistique, avec une approche systémique des infrastructures réseau 5G industrielle-*cloud*-IA-sécurité devient cruciale et essentielle.

Même si, comme la lecture de ces annales va vous le démontrer, les 5G professionnelles touchent déjà beaucoup de secteurs avec des histoires positives et inspirantes pour la suite du déploiement de la 5G industrielle en France, il nous faut maintenant accélérer, car la 6G, version avancée de la 5G, avec encore plus de fonctionnalités et de performance arrive, et la France doit être capable d'en tirer parti en ayant déjà pris le virage de la connectivité ubiquitaire, de l'intelligence des données, de la traçabilité, de la décarbonation, de la flexibilité/mobilité et de la résilience, qui représentent les principaux bénéfices de la 5G industrielle. La 6G sera IA native et intégrera des couches de données dédiées à la gouvernance de ces données et de l'IA, intégrant notamment les moyens d'adaptation dynamique à une réglementation évolutive du numérique.

Je désire terminer cette préface en reprenant une citation d'Antoine de Saint-Exupéry que j'ai faite mienne, qui s'appliquait bien à la Mission 5G industrielle mais qui continue à très bien s'appliquer à la situation actuelle des déclinaisons des 5G professionnelles que vous allez découvrir, développées dans ces annales : « Dans la vie, il n'y a pas de solutions ; il y a des forces en marche, il faut les créer et les solutions suivent. ». Les 5G professionnelles sont de formidables opportunités de revisiter, voire de réinventer les processus de chacune des activités, sachons nous en saisir en France !

Bonne lecture !

# Introduction

Par **Xavier LAGRANGE** et **Laurent TOUTAIN**

Professeurs à IMT Atlantique

Les réseaux 5G grand public sont entrés dans l'usage quotidien en 2026 et permettent principalement d'augmenter les débits de transmission par rapport aux technologies précédentes. Ce n'est cependant qu'une partie minime de ce que cette technologie permet pour le monde professionnel. Dans ce recueil, l'objectif est de montrer comment les concepts généraux présentés dans le numéro d'*Enjeux numériques* des *Annales des Mines* consacré aux infrastructures numériques du futur<sup>1</sup> trouvent une première instanciation avec la 5G professionnelle et en quoi elle est un élément de la numérisation de secteurs d'activité très variés.

Dès 2021, la France s'est dotée d'une stratégie nationale sur la 5G et les futures technologies de réseaux de télécommunications dans le cadre du plan France 2030. Cette stratégie, pilotée par la direction générale des Entreprises du ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique, est expliquée dans le premier article ; elle est également soutenue par l'Alliance 5G industrielle, décrite ensuite, qui fédère des fournisseurs d'infrastructure, des intégrateurs, des industriels et les pouvoirs publics.

Afin de garantir une disponibilité des communications et une qualité de service, il est nécessaire de disposer de fréquences adaptées et en quantité suffisante. L'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) a donc mis en place un cadre réglementaire souple d'accès aux ressources fréquentielle en 2025.

Ce numéro est aussi l'occasion de faire le point sur les connaissances scientifiques concernant d'éventuels effets biologiques et sanitaires des radiofréquences et de positionner la 5G par rapport aux technologies des précédentes générations et aux autres systèmes sans fil.

La deuxième partie aborde les questions d'architecture et de services disponibles en 5G en gardant à l'esprit que les choix sont dictés par les usages. Elle permet de bien positionner la 5G par rapport au *wifi*, notamment sur les aspects de la sécurité. Pour renforcer cette dernière, ajouter des analyses comportementales aux traditionnelles fonctions d'authentification dans un système de détection d'intrusion est particulièrement prometteur et s'intègre naturellement à l'architecture du réseau cœur 5G. Les réseaux mobiles terrestres sont les principaux vecteurs de communication mais les réseaux satellitaires, en particulier à orbite basse, peuvent représenter une alternative intéressante ou compléter utilement le segment terrestre.

Les plateformes d'expérimentation sont cruciales pour tester de nouveaux services et des évolutions techniques. Le panorama de ces plateformes confirme l'engagement national pour disposer de solutions souveraines pour la recherche sans oublier le nécessaire engagement dans la formation. Le développement d'outils pédagogiques sur ces plateformes est une condition indispensable au maintien d'une expertise technique nationale sur les technologies 5G et 6G.

---

<sup>1</sup> [https://annales-des-mines.org/wp-content/uploads/2024/09/en\\_27\\_09\\_24\\_bis-1.pdf](https://annales-des-mines.org/wp-content/uploads/2024/09/en_27_09_24_bis-1.pdf)

L'objectif de la troisième partie est de montrer la diversité des secteurs d'application de la 5G professionnelle. Alors que, jusqu'en 2024, elle faisait l'objet d'expérimentations, la 5G est maintenant progressivement déployée à un niveau opérationnel.

Il ne faut pas opposer les réseaux privés, dont l'infrastructure est totalement maîtrisée par l'entreprise utilisatrice, aux grands réseaux d'opérateurs. L'architecture de la 5G permet une hybridation et de multiples déclinaisons suivant le degré d'externalisation des fonctions de communication et de traitement tout en assurant, grâce au concept de *slice*, une isolation des flux. Cela se reflète dans la stratégie des grands opérateurs nationaux mais c'est également au cœur du Réseau Radio du Futur (RRF) dont l'enjeu est de garantir une disponibilité des communications aux services d'urgence en cas de crise.

Le domaine des transports est un des premiers cas de développement de la 5G professionnelle, comme l'exemple des aéroports parisiens le démontre. Les communications ferroviaires vont aussi reposer à moyen terme sur la 5G en remplacement des systèmes de 2<sup>e</sup> génération. La 5G permet aussi d'optimiser les transports urbains mais son acceptation nécessite d'intégrer les citoyens dans les décisions et d'intégrer l'impératif de réduction de l'empreinte environnementale.

L'utilisation de la 5G dans les centres hospitaliers est une condition du développement de l'hôpital numérique. Le déploiement de nombreuses têtes radios à très faible puissance permet de garantir une couverture excellente et facilite la géolocalisation. Les architectures hybrides sont, là encore, particulièrement intéressantes.

La 5G, par la faible latence et la fiabilité qu'elle offre, est également une technologie complémentaire à l'intelligence artificielle pour différents usages critiques (industrie, santé, énergie). En déportant les traitements vers la bordure (*edge computing*), elle est susceptible de repositionner les opérateurs télécoms comme acteurs stratégiques des infrastructures critiques.

Ce numéro ouvre enfin une perspective vers la 6G dont les premiers déploiements sont annoncés à partir de 2029. Loin de s'opposer à la 5G, elle en développe plusieurs aspects évoqués dans ce numéro : intégration de l'intelligence artificielle pour l'optimisation et la maintenance automatique du réseau, amélioration des performances et de la durabilité, renforcement de la sécurité, intégration aux réseaux non terrestres.

Pour conclure, nous tenons à remercier l'ensemble des auteurs de ce numéro qui se sont impliqués pour partager leur expérience et permettre au lecteur de bénéficier de synthèses rigoureuses sur un plan scientifique et technique tout en mettant l'accent sur les usages et les services qui doivent rester au cœur de tous les travaux sur la 5G professionnelle.

# Stratégie nationale sur la 5G industrielle

Par **Thomas ORAZIO**

Chef de projets Politique industrielle Télécoms  
à la direction générale des Entreprises (DGE)

Cinquième génération de réseaux mobiles, la 5G est un élément clé de l'adoption des futures technologies numériques par les différents secteurs de l'économie française, nécessaire au dynamisme de ces derniers au XXI<sup>e</sup> siècle.

La France a donc lancé en 2021 une stratégie nationale sur la 5G et les futures technologies de réseaux de télécommunications dans le cadre du plan France 2030. Ses objectifs stratégiques sont de soutenir le tissu industriel français dans son adoption rapide de cette technologie et de maîtriser ces nouvelles générations de technologies de communication afin de répondre aux enjeux d'autonomie stratégique et de souveraineté numérique.

Plusieurs actions ont été menées afin de répondre à ces objectifs : soutien financier pour tester de nouveaux cas d'usage innovants, animation et structuration de l'écosystème pour faciliter le partage des retours d'expérience, identification et levée des freins réglementaires... La stratégie soutient également l'émergence d'acteurs nationaux proposant les briques technologiques clés, au travers de dispositifs de financement de l'innovation.

Ces actions ont permis le déploiement de la 5G privée sur 116 sites (dont 33 de manière pérenne) répartis sur tout le territoire. La DGE reste mobilisée sur le sujet et réfléchit aux suites à donner pour poursuivre son action.

## INTRODUCTION

Les études économiques sont sans appel : le dynamisme de l'économie française au XXI<sup>e</sup> siècle dépendra en grande partie de l'adoption des nouvelles technologies numériques, telles que l'IA, la réalité augmentée et virtuelle ou la robotique par les différents secteurs économiques, comme l'industrie, l'énergie, l'agriculture, les transports, la santé. Cinquième génération de réseaux mobiles, la 5G est un élément clé de l'adoption de ces technologies numériques puisqu'elle constitue un socle essentiel à nos infrastructures numériques. Pour tous ces secteurs, la 5G permet une meilleure résilience des réseaux et une moindre latence que les générations précédentes, permettant ainsi non seulement d'optimiser les processus existants au sein des entreprises mais également de créer de nouveaux cas d'usage permettant de nouvelles opportunités de marché. À titre d'exemple, la 5G, en permettant le traitement simultané d'un nombre particulièrement important de signaux, permet l'essor de l'industrie de nouvelle génération, dite « 4.0 » (la maintenance préventive, la fabrication de haute précision, le suivi logistique d'un très grand nombre d'articles...), ou encore de l'automobile connectée (communications ultra-fiables à très faible latence pour les véhicules connectés et autonomes). La 5G offre également de réelles perspectives dans des domaines relevant, par exemple, des services publics territoriaux, comme les services hospitaliers (pour des ambulances connectées, par exemple), de la

mobilité (en gérant les flux de circulation) ou bien pour l'agriculture (économies d'eau et d'utilisation des produits phytosanitaires, bien-être animal, etc.).

Airbus vise, par exemple, à déployer la 5G privée sur l'ensemble de ses usines d'ici 2027 afin de soutenir la forte montée en cadence de production et d'accélérer les projets de simulation 3D, de réalité augmentée, d'amélioration de la traçabilité des pièces et de maintenance prédictive.

Dans les prochaines décennies, la bonne intégration dans le processus industriel des technologies de communication permettra de tirer le maximum de bénéfices de nouvelles technologies nécessitant des transferts de données importants et une adaptation en temps réel de l'action au contexte : intelligence artificielle pour des prises de décision fondées sur la réalité du terrain en temps quasi-réel, réalité augmentée superposant le monde virtuel et réel de manière fluide, robots pouvant communiquer entre eux sur une chaîne de production ou dans un campus industriel...

Il paraît donc important pour le tissu industriel français d'adopter rapidement cette technologie afin de bénéficier dès maintenant des avantages de celle-ci et de disposer d'ores et déjà des infrastructures les plus performantes pour faciliter la bonne intégration des autres technologies numériques, dont les nouvelles générations de télécommunication par la suite.

Dans cette perspective, il paraît également important pour la France de maîtriser ces nouvelles générations de technologies de communication afin de répondre aux enjeux d'autonomie stratégique et de souveraineté numérique.

Fort de ce constat, la France a lancé en 2021 une stratégie nationale d'accélération sur la 5G et les futures technologies de réseaux de télécommunications, dotée de 520 M€ publics dans le cadre du plan France 2030. Coordonnée par la direction générale des Entreprises et co-construite par l'État et les acteurs de l'écosystème (industriels, organismes de recherche, collectivités...), celle-ci se décline en quatre axes :

- contribuer à la compétitivité de l'économie française en développant les usages 5G au profit des territoires et de l'industrie (volet demande) ;
- construire une offre française souveraine sur les réseaux télécoms à horizon 2022-2023 (volet offre) ;
- soutenir une R&D française de pointe sur les futures technologies de réseaux (volet R&D) ;
- renforcer la formation et attirer les talents pour répondre aux besoins de compétences sur la conception et le déploiement des réseaux du futur (volet formation).

Pour atteindre cet objectif, l'État a mis en œuvre plusieurs leviers : soutiens financiers, sensibilisation et animation de l'écosystème et cadre réglementaire favorable.

## **INCITER LES ADOPTEURS PRÉCOCES À TESTER CETTE NOUVELLE TECHNOLOGIE**

La première étape de la stratégie fut d'initier des expérimentations pour identifier les cas d'usage les plus prometteurs, d'une part, et à tester des solutions fournies par les entreprises françaises positionnées sur la 5G, d'autre part. Cette phase a visé l'identification des cas d'usage concrets qui pourraient intéresser l'écosystème français et valider leur pertinence, et, d'autre part, de servir de démonstrateur auprès du reste de l'écosystème afin d'attirer son regard sur cette nouvelle technologie.

Un appel à projets (AAP) a ainsi été lancé de septembre 2020 à 2021, visant la mise en œuvre de cas d'usage 5G dans le contexte industriel ainsi que des cas d'usage non-

industriels, par exemple dans les services publics des territoires. Celui-ci a permis de soutenir le développement de 21 cas d'usage au sein de plateformes d'expérimentation dans plusieurs domaines tels que l'industrie du futur, les transports, l'agriculture connectée, l'énergie, la santé, et d'autres domaines sectoriels, comme l'événementiel, répartis sur toute la France. Au total, 56 entreprises, dont 35 *startups* et PME, ont été soutenues à hauteur de 62 M€ de financements publics pour un montant total d'investissements de 163 M€ (dont 27,5 M€ de fonds publics attribués aux *startups* et PME).

Ces projets pilotes ont permis de développer des cas d'usage industriels aussi variés que des machines connectées au sein d'usines, le développement de solutions pour des techniciens augmentés, ou encore la mobilité autonome dans des campus industriels extérieur et intérieur ou des zones portuaires.

Ils ont également permis de tester des cas d'usage non industriels, tels que la détection accrue des fuites d'eau via de nouvelles solutions de traitement des données s'appuyant sur les bénéfices de la 5G afin de réduire le gaspillage d'eau potable, et d'éviter une contamination des sols par des eaux usées, ou bien la gestion de capteurs permettant de mesurer la qualité de l'air et d'adapter le trafic routier de manière dynamique.

Ils ont permis de confirmer les intérêts pressentis de la 5G au regard d'autres technologies de communication : la gestion d'une grande quantité de données en simultanée et avec un temps de latence particulièrement faible, la continuité de réseau sur de grands espaces, etc.

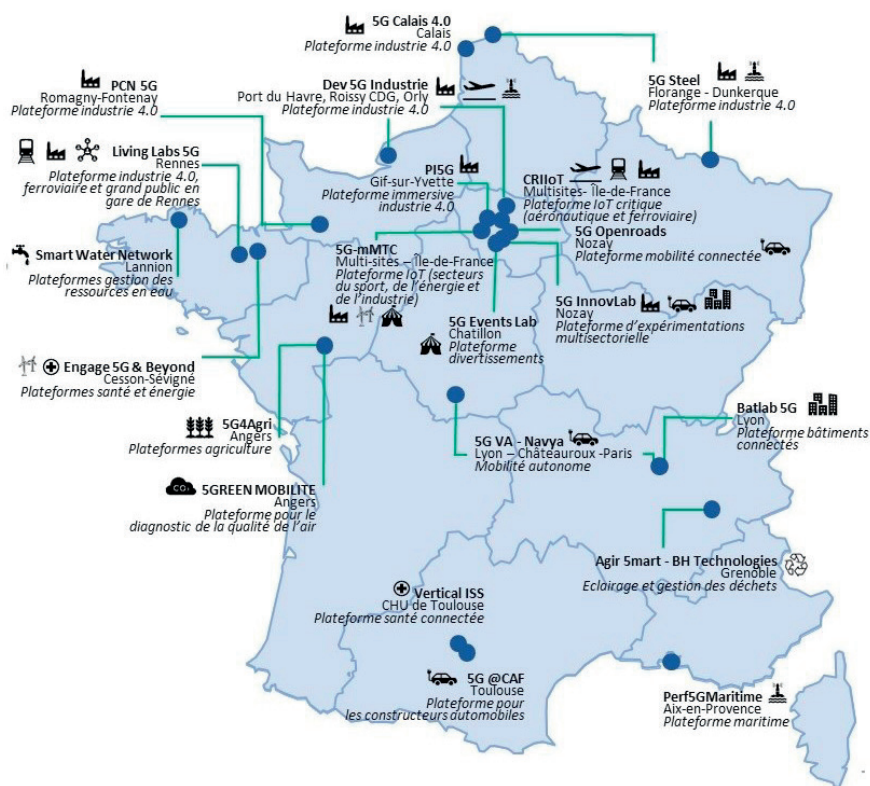


Figure 1 : Répartition géographique des 21 premières plateformes 5G de France 2030 (Source : Rapport de la Mission 5G industrielle, 2022).

## IDENTIFIER ET LEVER DE POTENTIELS VERROUS EMPÊCHANT LA DIFFUSION DE CETTE TECHNOLOGIE

Dans le prolongement de ce premier dispositif, le Gouvernement a lancé fin 2021 la mission 5G industrielle, présidée par Philippe Herbert, afin d'accélérer le déploiement d'applications industrielles de la 5G pour en faire des leviers de compétitivité, d'attractivité et d'innovation de l'industrie française. L'objectif était notamment d'identifier, au travers d'un dialogue soutenu avec l'écosystème, les freins potentiels et les actions pouvant les lever.

Ce rapport a permis de mettre en évidence 3 besoins :

- mieux informer l'écosystème quant aux possibilités offertes par la 5G ;
- faciliter et pérenniser l'accès aux fréquences ;
- favoriser l'émergence d'une offre française de qualité de 5G privée.

### Informier et sensibiliser l'écosystème

Afin de répondre au constat de la mission 5G industrielle d'un manque de connaissance de l'intérêt et des apports potentiels de la 5G pour l'industrie, l'État a mis en place plusieurs actions permettant, d'une part, de mettre en valeur les cas d'usage émergents en France de cette technologie et, d'autre part, d'inciter l'écosystème à tester les possibilités offertes par cette technologie pour développer ses propres cas d'usage.

*Inciter l'écosystème à tester avec des acteurs fiables et reconnus les possibilités offertes par la technologie pour développer ses propres cas d'usage*

Afin d'inciter les acteurs industriels à expérimenter, puis s'appropriier les usages de la 5G, la stratégie d'accélération a lancé, de mars à septembre 2022, l'appel à manifestation d'intérêt (AMI) « Soutien à la mise en place de Campus Fablab 5G industrielle ». L'État a ainsi soutenu le développement de 2 structures physiques ouvertes aux entreprises, qui ont déployé des équipements et services 5G et dont le rôle est d'aider les PME à s'approprier la 5G industrielle *via* des ateliers de sensibilisation, des diagnostics, des tests, des formations et d'autres mesures d'accompagnement : le Cetim à Cluses et ExcelCar à Rennes. Fruit de la dynamique lancée, un troisième Campus Fablab, TheCamp, a également ouvert à Aix-en-Provence sans apports financiers de l'État.

*Mettre en valeur les cas d'usage émergents en France de cette technologie*

La DGE a par ailleurs cherché à mieux structurer l'écosystème en travaillant avec le comité stratégique de filière<sup>1</sup> (CSF) « Infrastructures numériques » et la Mission 5G industrielle à la mise en place d'un réseau d'entreprises travaillant à la mise en œuvre de cas d'usage 5G, baptisé « plateforme 5G ». Finalisé en 2024, 28 plateformes, dont les projets issus de l'AAP lancé en 2021 et de l'AMI Campus Fablab, ont été sélectionnées. L'objectif visé était de mettre en valeur ces plateformes, pérenniser le partage d'informations et la diffusion des résultats entre celles-ci, ainsi que d'ouvrir ces plateformes aux entreprises, notamment aux TPE et PME, afin de favoriser le développement de cas d'usage 5G par ces catégories d'acteurs.

---

<sup>1</sup> Pour rappel, les comités stratégiques de filière (CSF) sont des outils de pilotage de stratégie industrielle permettant d'instaurer un dialogue concret, performant et régulier entre l'État, les entreprises et les représentants des salariés sur des verticales industrielles prédéfinies.

Suite à ce travail, plusieurs actions clés ont été menées pour sensibiliser l'industrie française aux bénéfices de la 5G industrielle :

- co-production par le CSF « Solutions industrie du futur » et le CSF « Infrastructures numériques » d'un guide<sup>2</sup> visant à présenter la 5G industrielle de manière vulgarisée aux PME ainsi que la manière de déployer de tels réseaux ;
- production d'un catalogue recensant les cas d'usage 5G : les acteurs ont rédigé et publié un catalogue accessible en ligne présentant de manière approfondie les cas d'usage industriels et non-industriels de la 5G afin de mieux informer le reste de l'écosystème ;
- animation de l'écosystème : la DGE a lancé d'avril à novembre 2024 un « tour de France des plateformes industrielles ». Animé par Philippe Herbert, l'objectif était d'inviter l'industrie française à venir découvrir la 5G dans des sites clés répartis sur tout le territoire, afin de favoriser la discussion et le partage d'expérience. 5 événements ont ainsi été organisés sur cette période.

Ce travail a mené à la création de l'Alliance 5G industrielle en juillet 2025, une initiative privée visant à promouvoir les réseaux mobiles professionnels (RMP) conformes au standard 3GPP, au service de l'industrie française et de ses activités à l'international. Cette promotion s'appuie sur des échanges avec les acteurs des différentes filières industrielles ainsi que sur l'organisation, la participation à des événements spécialisés et la diffusion de publications ciblées.

## L'enjeu de l'accès aux fréquences

Pour rappel, les ondes électromagnétiques permettent la transmission de données ou d'énergie sans fil. Ces ondes se propagent à différentes fréquences, dites fréquences radioélectriques. La bonne gestion du spectre de fréquences radioélectriques est importante pour éviter les risques de brouillage.

Les bandes de fréquences nécessaires pour la 5G sont sous licence, ce qui veut dire qu'elles nécessitent une autorisation administrative et le paiement d'une redevance.

En 2019, l'Arcep a lancé un guichet d'expérimentation sur la bande 2,6 GHz TDD (2 570–2 620 MHz), identifiée comme une bande clé pour permettre l'émergence de nouveaux usages, après consultation des acteurs économiques. Il a permis aux industriels souhaitant tester de nouveaux cas d'usage de demander une autorisation à l'Arcep d'utiliser ces fréquences. Il a été complété en 2022 par un nouveau guichet permettant l'accès aux fréquences 3,8–4,0 GHz, en réponse à la demande d'industriels souhaitant utiliser cette bande de fréquence de manière complémentaire.

Suite à l'intérêt manifesté par les industriels sur ces bandes<sup>3</sup> et aux conclusions de la CEPT (Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications) concernant l'harmonisation des bandes de fréquences allouées à la 5G industrielle, l'Arcep a pérennisé, en septembre 2025, l'attribution des fréquences de la bande 3,8–4,2 GHz pour les réseaux mobiles à très haut débit pour les besoins professionnels. Les demandeurs peuvent solliciter l'attribution d'un maximum de 100 MHz entre 3,8 et 4,2 GHz, sous forme d'autorisation locale d'utilisation de fréquences pour des usages professionnels, pour une durée maximale de dix ans. Cette pérennisation permet d'offrir de la visibilité

---

<sup>2</sup> La 5G industrielle Quelles opportunités pour les PME et ETI ?

<sup>3</sup> Depuis mars 2022, l'Arcep a délivré 175 autorisations d'utilisation de fréquences dans le cadre de son guichet d'expérimentations dans la bande 3,8–4,0 GHz. Parmi les expérimentations concernées par ces autorisations, environ 90 sont en cours à la fin du deuxième trimestre 2025.

aux acteurs souhaitant déployer de la 5G industrielle en s'assurant notamment de s'inscrire dans un cadre européen harmonisé.

Jouant son rôle d'animation de l'écosystème, l'Alliance 5G industrielle a par la suite développé un simulateur permettant aux entreprises d'estimer le coût des redevances des fréquences 5G privées, afin de faciliter la prise de décision des entreprises concernant le déploiement.

## Développement de solutions souveraines en 5G industrielles

### *Soutien au développement d'une offre de 5G industrielle*

L'importance de plus en plus prégnante du numérique dans les processus et activités des différents secteurs économiques français renforce le rôle stratégique des solutions de connectivité avancées qui permettent le transfert de leurs données. La stratégie de l'État vise donc à soutenir la croissance de l'écosystème national sur ces thématiques avec un focus particulier sur l'émergence d'un tissu d'ETI/PME/startup pouvant se positionner sur l'ensemble de la chaîne de valeur technologique (cœur de réseau, RAN, antenne, microélectronique...) et collaborant ensemble afin d'avoir un écosystème maîtrisant l'ensemble de la chaîne de valeur. L'approche privilégiée par l'État est de stimuler la montée en qualité des offres de l'écosystème déjà existantes en soutenant financièrement les projets d'innovation de ces acteurs. La stratégie a ainsi permis, à ce stade, le soutien d'une vingtaine de projets de recherche et d'innovation identifiés via un appel à projets lancé en octobre 2020 et clôturé en septembre 2021, totalisant plus de 130 M€ d'investissements, dont plus de 80 M€ de soutien public. Ce dispositif a permis de soutenir plus d'une trentaine d'ETI/PME/startup françaises comme Amarisoft, Ekinops, Kalray, AW2S, Firecell... qui se positionnent sur le développement d'offres technologiques à destination de la 5G industrielle.

Le soutien à l'écosystème national en matière de technologies de réseaux 5G privés se fait également de manière pragmatique et articulée avec, d'une part, les modalités de soutien mises en œuvre au niveau européen (notamment Horizon Europe), et, d'autre part, en lien avec les grands équipementiers européens, notamment Nokia et Ericsson, afin de développer leurs activités de R&D en France et d'en faire bénéficier nos entreprises innovantes françaises. Ceci permet de créer de l'emploi dans ce secteur et de développer les compétences nationales sur cette nouvelle technologie et, ainsi, de renforcer notre capacité nationale à maîtriser ces technologies clés pour notre souveraineté numérique.

### *Développement de la coopération franco-allemande sur la 5G privée*

Le développement de la coopération franco-allemande sur la 5G privée est un des axes de l'engagement de coopération entre les deux pays sur les futures technologies, comme rappelé en octobre 2020, à Aix-La-Chapelle. Deux appels à projets successifs ont été lancés conjointement par la France et l'Allemagne afin d'expérimenter des cas d'usage innovants et de développer les briques technologiques adaptées à ceux-ci. Ces initiatives ont permis de soutenir financièrement le développement de 7 projets franco-allemands à hauteur de 22 M€, dont 12 M€ d'aide pour la partie française, dans des domaines tels que la santé (dispositifs robotiques sans fil dans les blocs opératoires), les systèmes ferroviaires, la vidéo ou l'industrie manufacturière (télévision et supervision de processus). Ces projets ont permis une meilleure structuration de l'écosystème franco-allemand, notamment concernant le développement de briques technologiques pour des solutions de 5G privée, auquel ont participé différentes PME françaises telles que Ateame, Firecell, Ekinops, Alsatis ou Kalray.

## CONCLUSION

La stratégie nationale portant sur la 5G industrielle a eu deux objectifs complémentaires :

- stimuler la demande en 5G industrielle en soutenant, d'une part, financièrement les utilisateurs précoces pour les premiers cas d'usage, puis en animant l'écosystème afin que celui-ci mette en valeur ces cas d'usage et proposer des documents aidant l'ensemble de l'écosystème français à bien appréhender les enjeux autour de cette technologie, et, d'autre part, en offrant un cadre réglementaire adapté et pérenne, ce qui impliquait d'identifier et de lever les freins potentiels ;
- stimuler le développement d'une offre souveraine innovante en soutenant financièrement des projets de R&D portés par les ETI/PME sur le territoire.

Ces actions ont permis le déploiement de la 5G privée sur 116 sites<sup>4</sup> (dont 33 de manière pérenne) répartis sur tout le territoire. Bien que le marché en France de la 5G privée soit moins dynamique qu'initialement prévu, comme sur l'ensemble du territoire européen (environ 30 sites 5G privée totalement opérationnels au Royaume-Uni, environ 49 en Allemagne), l'animation par l'écosystème privé *via* l'Alliance 5G industrielle et la pérennisation des fréquences, permettant une meilleure visibilité pour la prise de décision des industriels, devraient permettre d'accélérer le déploiement des solutions dans les campus industriels. La DGE reste mobilisée sur le sujet et réfléchit aux suites à donner pour poursuivre son action.

---

<sup>4</sup> En juillet 2025, le suivi des autorisations d'utilisation de fréquences pour les réseaux mobiles privés accordée par l'Arcep permettent d'estimer à 116 le nombre de sites ayant déployé de la 5G privée dont 33 de manière pérenne.

# L'Alliance 5G industrielle : un levier collectif pour accélérer le déploiement des réseaux 5G privés

Par Thomas HERVIEU  
Alliance 5G industrielle

La technologie 5G a été conçue spécifiquement pour les usages professionnels. Les réseaux 5G privés répondent à des besoins de mobilité, de couverture étendue, de continuité de service et de maîtrise de l'infrastructure qui deviennent centraux dans l'industrie, la logistique, l'énergie ou les transports. Si l'écosystème produit est désormais bien présent, le passage à l'échelle reste encore concentré chez les grands acteurs capables de porter des projets complexes. L'enjeu des prochaines années est donc moins de démontrer la pertinence technique de la 5G privée que d'en faciliter l'appropriation par un plus grand nombre d'entreprises, en la reliant plus directement aux cas d'usage, à l'IA, au jumeau numérique et aux priorités de transformation des filières.

## INTRODUCTION ET POSITIONNEMENT GLOBAL DES RÉSEAUX 5G PRIVÉS

Les réseaux 5G privés s'installent progressivement dans le paysage industriel français. Ils répondent à un besoin de connectivité plus maîtrisée, plus prévisible et mieux adaptée à des environnements où la mobilité, la continuité de service, la couverture de grands espaces et la sécurité des échanges deviennent des paramètres de production. Ils ne doivent toutefois pas être présentés comme un simple « *wifi* plus puissant ». Leur intérêt tient à une architecture cellulaire complète, pensée pour piloter la mobilité, garantir des niveaux de service, protéger les communications et s'intégrer à des systèmes d'exploitation de plus en plus numérisés.

## SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES ET DIFFÉRENCES PAR RAPPORT AU *WIFI*

La comparaison avec le *wifi* est utile à condition de rester mesuré. Le *wifi* conserve toute sa pertinence pour des usages de proximité, en environnement tertiaire ou industriel, lorsque les besoins portent d'abord sur une desserte locale à courte portée. Mais dès lors que l'on cherche à couvrir des surfaces étendues, des zones extérieures, des bâtiments de grande hauteur, des équipements en mouvement ou des usages critiques, ses limites apparaissent plus nettement. Le *wifi* repose principalement sur des fréquences libres, sur des puissances d'émission limitées et sur un maillage dense de bornes, avec des débits utiles plus variables, notamment en bordure de couverture. À l'inverse, la 5G privée s'appuie sur des fréquences affectées, sur une architecture conçue pour la mobilité et

sur des mécanismes de gestion radio permettant de maintenir un niveau de service plus homogène sur des surfaces plus vastes.

Cette différence apparaît de façon particulièrement concrète dans les environnements logistiques, industriels et de transport. Sur un site étendu, un réseau *wifi* devra souvent multiplier les points d'accès pour atteindre la couverture recherchée, avec à la clé davantage d'équipements actifs, davantage de contraintes d'installation et davantage de maintenance. Au contraire, un réseau d'accès 5G privé peut, à service équivalent, atteindre le niveau de couverture et de débit visé avec moins d'éléments rayonnants, en particulier lorsque la mobilité, la voix, le suivi d'actifs ou certains usages vidéo doivent être traités de manière continue.

L'autre apport spécifique de la 5G privée réside dans la mobilité native. Dans un réseau cellulaire, c'est le réseau lui-même qui orchestre le passage d'une cellule à l'autre, alors qu'en *wifi* la qualité du *roaming* dépend encore fortement des équipements, de leur configuration et du niveau d'implémentation des standards associés. Le sujet est décisif dans les entrepôts, les sites aéroportuaires, les infrastructures de transport, les zones industrielles étendues ou les environnements où terminaux, véhicules et opérateurs sont continuellement en mouvement. À cela s'ajoute la question de la voix : dans l'écosystème 5G, les mécanismes de priorisation et les services voix sont plus directement intégrés, ce qui facilite l'obtention d'un service robuste lorsque les communications vocales doivent coexister avec d'autres flux de données. Sur le volet cybersécurité enfin, la 5G privée bénéficie d'une logique d'authentification, de chiffrement et de séparation des flux pensée dès l'origine dans les standards mobiles, là où un réseau *wifi* nécessite souvent des couches complémentaires pour atteindre un niveau de protection équivalent.

## FACTEURS DE FREIN ET DÉCALAGES ENTRE ATTENTES ET RÉALISATION

Ces atouts ne signifient pas que la 5G privée se diffuse spontanément. Le passage à l'échelle reste aujourd'hui difficile. L'adoption se fait d'abord chez les grands acteurs capables de porter des projets transverses, de financer des phases de test et de transformer un démonstrateur en projet industriel. C'est dans ce cadre que l'on voit aujourd'hui avancer en priorité de grands acteurs des transports, des aéroports, de l'énergie ou de l'industrie, à l'image de la RATP, d'EDF, d'Air France, d'Airbus ou d'ArcelorMittal. Cette réalité n'est pas surprenante : la 5G privée concerne à la fois les télécommunications, les systèmes d'information, les opérations industrielles, la cybersécurité et parfois la stratégie immobilière ou de site. Peu d'organisations disposent en interne de toutes ces compétences et de cette capacité de coordination.

La difficulté commence lorsque l'on cherche à diffuser ces solutions vers des acteurs plus petits. Pour une PME ou une ETI, la question n'est pas tant de comprendre que la 5G privée peut apporter quelque chose, mais de savoir dans quel cas précis elle crée de la valeur, comment elle s'articule avec l'existant, quel budget elle suppose, qui l'exploite et selon quel modèle économique. Beaucoup d'entreprises perçoivent encore la 5G privée comme un sujet complexe, coûteux ou réservé à de très grands sites. D'autres l'analysent uniquement comme une alternative de connectivité, sans toujours voir qu'elle peut devenir une brique structurante pour la continuité d'exploitation, la sûreté, la voix, la robotisation mobile, la vidéo embarquée, le suivi d'actifs ou l'exploitation en temps réel.

Ce décalage explique pourquoi la phase actuelle est moins une question de faisabilité technique qu'une question d'industrialisation. En France, le cadre réglementaire a pourtant nettement progressé. L'Arcep a ouvert en 2022 un guichet d'expérimentations en bande 3,8–4,0 GHz pour permettre aux acteurs industriels et à d'autres secteurs verticaux de tester de nouveaux usages, avant d'étendre en 2025 ce cadre à l'ensemble de la

bande 3,8–4,2 GHz. Son rapport d'activité 2025 souligne que des modalités d'attribution pérennes ont été confirmées dans cette bande, et l'Autorité a indiqué en juillet 2025 avoir délivré depuis 2022 **175 autorisations d'expérimentation**, avec environ **90 expérimentations encore en cours** à la fin du deuxième trimestre 2025. Le sujet n'est donc plus marginal : il entre dans une phase de structuration.

## ÉCOSYSTÈME, RÔLE DE L'ALLIANCE ET CONDITIONS D'APPROPRIATION

Dans ce contexte, il serait erroné de dire que l'écosystème 5G n'existe pas. L'écosystème produit est bien présent. Les briques technologiques sont là : réseau d'accès radio, cœur de réseau, terminaux durcis ou grand public adaptés, solutions voix, cybersécurité, *edge computing*, intégration SI/OT, outils de supervision, applications métiers. En parallèle, l'Alliance 5G industrielle s'est donné pour mission de mener des actions de promotion auprès des filières industrielles et de fédérer les acteurs concernés autour du développement des réseaux mobiles privés conformes aux standards 3GPP. Son site met d'ailleurs en avant une grande diversité de filières, de l'aéronautique à la logistique, en passant par les transports, l'électricité, la chimie, la santé ou encore les biens manufacturés.

Le sujet n'est donc pas l'absence d'offre, mais la capacité à rendre cette offre lisible, cohérente et accessible. Une technologie peut être mature sans pour autant être immédiatement appropriable par son marché. Il faut encore des références, des retours d'expérience, des méthodes de qualification des cas d'usage, des schémas de déploiement reproductibles et un langage commun entre offreurs, intégrateurs, industriels et institutionnels. De ce point de vue, le rôle d'une alliance sectorielle est moins de créer un marché que d'aider à le clarifier, à le faire connaître et à le relier plus directement aux besoins opérationnels des filières.

C'est aussi la raison pour laquelle les priorités d'action pour accélérer sont avant tout d'ordre organisationnel et stratégique.

## PRIORITÉS ACTIONNABLES POUR ACCÉLÉRER L'ADOPTION

La première est le **sponsoring de la direction** de l'entreprise. Une 5G privée ne peut pas rester un sujet cantonné à la seule direction technique ou à une expérimentation portée par quelques convaincus. Dès qu'un projet touche à la production, à la maintenance, à la logistique, à la sûreté ou à la transformation d'un site, il doit être porté au bon niveau de gouvernance. Sans appui clair de la direction, les arbitrages entre métiers, DSI, équipes réseau, cybersécurité et exploitation sont plus lents, et le projet risque de s'enliser ou de rester à l'état de pilote.

La deuxième priorité est l'**évangélisation**. Il faut encore expliquer ce qu'est réellement une 5G privée, ce qu'elle permet, ce qu'elle ne remplace pas et dans quels cas elle devient préférable à d'autres solutions. Ce travail de pédagogie est indispensable pour éviter deux écueils symétriques : la promesse excessive, qui vendrait la 5G comme une réponse universelle, et la sous-estimation, qui la réduirait à une variante plus coûteuse du *wifi*. L'enjeu est d'aider les entreprises à raisonner non pas en technologie pure, mais en niveau de service, en contraintes d'exploitation et en valeur métier.

La troisième priorité consiste à **focaliser les démarches sur les cas d'usage**. Les projets qui avancent le mieux sont ceux qui partent d'un besoin clair : mobilité sur site étendu, continuité de service, voix critique, vidéo mobile, suivi d'actifs, automatisation, pilotage d'engins, maintenance augmentée, géolocalisation ou coordination en temps réel. Tant que la 5G privée est envisagée comme une infrastructure abstraite, elle peine à trouver son modèle. Dès qu'elle est rattachée à un cas d'usage prioritaire, elle peut être

évaluée sur des critères concrets : disponibilité, sécurité, productivité, qualité de service, réduction des interventions ou fluidité des opérations.

Enfin, la quatrième priorité est de **l'associer plus systématiquement à l'intelligence artificielle et au jumeau numérique**. La 5G privée prend toute sa portée lorsqu'elle devient une couche de collecte, de transport et d'orchestration de données au service d'autres transformations. L'IA a besoin de données fiables, continues et contextualisées. Le jumeau numérique suppose une remontée d'informations depuis le terrain, parfois en quasi-temps réel, afin de représenter fidèlement l'état d'un site, d'un flux, d'un équipement ou d'une opération. Dans cette perspective, la 5G privée n'est plus un sujet isolé de connectivité : elle devient une infrastructure support de la décision, de l'automatisation et de la simulation industrielle.

## CONCLUSION : VERS UNE VÉRITABLE INDUSTRIALISATION DE LA 5G PRIVÉE

Le passage de l'expérimentation à l'industrialisation dépendra donc de cette capacité collective à relier technologie, usages et gouvernance. Les réseaux 5G privés ne remplaceront ni toutes les infrastructures existantes ni tous les réseaux *wifi*. En revanche, ils ont vocation à s'imposer là où la mobilité, la maîtrise de l'infrastructure, la sécurité, la couverture de grands espaces et la continuité de service constituent des exigences de premier rang. La France dispose aujourd'hui d'un cadre de fréquences plus lisible, d'un tissu d'acteurs riche et d'une dynamique d'expérimentation avérée. L'enjeu des prochaines années est de transformer ces acquis en déploiements pérennes, reproductibles et accessibles à un nombre plus large d'entreprises. C'est précisément sur ce terrain que l'Alliance 5G industrielle peut jouer un rôle utile : rendre le sujet plus lisible, rapprocher les filières, diffuser les références et contribuer à faire de la 5G privée non plus un sujet d'avant-garde, mais un outil industriel à part entière.

# La gestion du spectre pour les usages professionnels

Par Patrick LAGRANGE

Responsable de l'unité « fréquences et technologies » de l'Arcep

La mise en place de réseaux sans fil aux fins de répondre aux usages professionnels nécessite de disposer des fréquences adaptées et en quantité suffisante. Le législateur a confié à l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) la charge de réguler l'accès aux ressources fréquentielles nécessaires. L'Arcep contribue depuis plusieurs années à la mise en place d'un cadre réglementaire souple et adapté aux différents besoins exprimés par les acteurs de l'écosystème professionnel.

## HISTORIQUE

L'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) est à l'écoute des acteurs industriels, aussi appelés « verticaux », afin d'intégrer au mieux leurs besoins spécifiques dans la poursuite de ses objectifs de régulation. Depuis la fin des années 1990, des fréquences sont mises à disposition dans les bandes dites VHF/UHF (< 500 MHz) pour mettre en œuvre des réseaux professionnels essentiellement dédiés à des communications vocales.

Les usages évoluant et les technologies devenant de plus en plus abordables pour des réseaux de petite taille, l'Arcep a consulté à de nombreuses reprises les acteurs professionnels pour entendre les besoins d'évolution. Cela a conduit à la mise à disposition progressive de fréquences supplémentaires, d'abord pour réaliser des expérimentations<sup>1</sup>, puis pour obtenir des droits d'utilisation sur des durées plus longues.

La consultation « De nouvelles fréquences pour les territoires, les entreprises, la 5G et l'innovation »<sup>2</sup> a été menée au début 2017 et a ouvert le chemin vers l'attribution d'une première bande de fréquences adaptée aux réseaux très haut débit pour les usages professionnels.

En 2018, dans le cadre de la préparation de l'attribution de nouvelles bandes de fréquences mobiles pour introduire la technologie 5G, le besoin des usages à destination des « verticaux » a été abordé à nouveau et a abouti à ce que les titulaires de licence d'utilisation soient en mesure d'offrir des solutions opérées pour les usages professionnels.

<sup>1</sup> Tableau de bord des expérimentations 5G industrielles et innovantes en France (Arcep), <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-de-bord-des-experimentations-5g-en-france.html>

<sup>2</sup> Consultation publique sur de nouvelles fréquences pour les territoires, les entreprises, la 5G et l'innovation (Arcep), <https://www.arcep.fr/actualites/les-consultations-publiques/p/gp/detail/consultation-publique-sur-de-nouvelles-frequences-pour-les-territoires-les-entreprises-la-5g-et-l.html>

Par la suite, dans la consultation publique lancée en 2022 sur le futur des réseaux mobiles<sup>3</sup>, l'Arcep a consacré une partie importante aux acteurs professionnels notamment en les interrogeant sur les technologies, les architectures de réseaux ou encore les modèles d'affaires les plus adaptés à leurs attentes. Les contributions ont permis de lancer les travaux sur la nouvelle bande de fréquences 3,8–4,2 GHz.

En parallèle, et dans le contexte de l'harmonisation internationale de l'utilisation du spectre radioélectrique, l'Arcep maintient également un cadre réglementaire propice à l'utilisation des bandes utilisables sans licence, bandes dites libres, pour offrir un ensemble flexible de ressources fréquentielles aux acteurs « verticaux ».

## LES DIFFÉRENTES OPTIONS D'ACCÈS AUX FRÉQUENCES POUR LES RÉSEAUX PROFESSIONNELS

### Réseau opéré par un opérateur national

Les usages professionnels peuvent s'appuyer sur les réseaux des opérateurs nationaux principalement déployés pour servir les abonnés particuliers mais qui offrent également des solutions adaptées aux professionnels.

De nouvelles bandes de fréquences ont été progressivement mises à disposition et utilisées par des nouvelles technologies permettant un usage plus pertinent pour les usages professionnels en termes de performances (débit, latence, fiabilité), et ce dès l'introduction des réseaux à très haut débit en 4G, y compris pour les solutions de l'internet des objets, particulièrement sollicitées pour les usages professionnels.

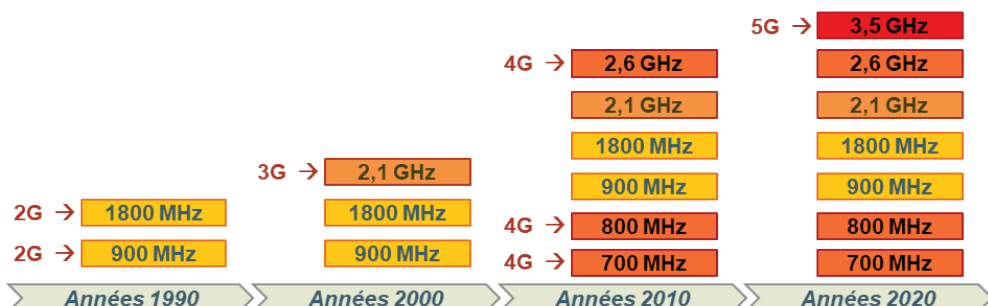


Figure 1 : Attribution des fréquences pour les opérateurs nationaux (Source : Arcep).

Plus particulièrement, les performances attendues en 5G ont conduit l'Arcep à intégrer dans les autorisations d'utilisation de fréquences en bande 3,5 GHz, attribuées en 2020 aux opérateurs mobiles de l'Hexagone, plusieurs dispositions visant à faciliter l'accès à la connectivité mobile des verticaux, *via* la fourniture de services et/ou d'offres adaptés à ces acteurs. Plusieurs schémas d'intégration plus ou moins forte des réseaux publics et privés sont alors envisageables<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Préparer le futur des réseaux mobiles (23 mai 2022, Arcep), <https://www.arcep.fr/actualites/les-consultations-publiques/p/gp/detail/preparer-le-futur-des-reseaux-mobiles-230522.html>

<sup>4</sup> Communiqué de presse – Réseaux - Réseaux du futur (Arcep), <https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiques/detail/n/reseaux-du-futur-041024.html>

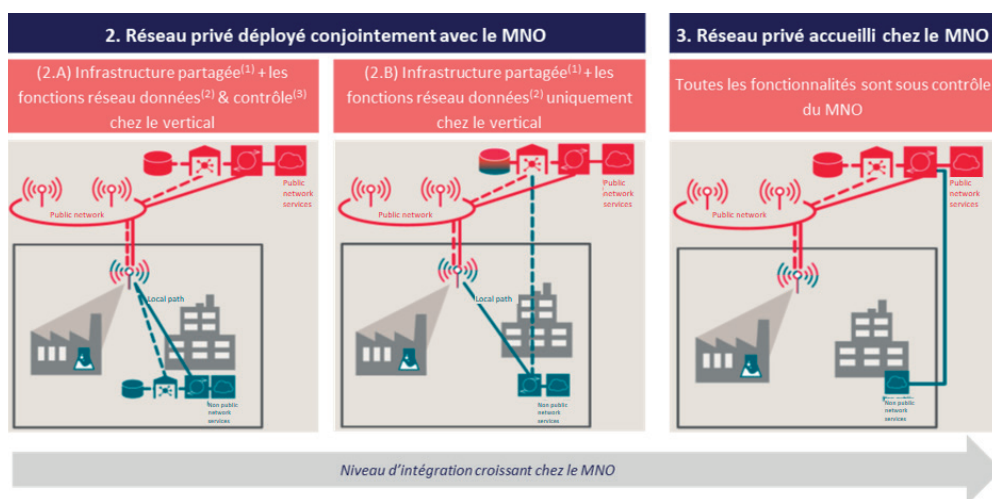


Figure 2 : Solutions d'intégration entre les réseaux privés et les réseaux publics (Source : Arcep).

## Réseau privé à très haut débit

Les réseaux pour les usages professionnels peuvent également être construits de façon autonome et *ad hoc* avec des fréquences qui leur sont dédiées.

À ce jour, l'Arcep attribue des fréquences pour des usages professionnels dans deux bandes de fréquences distinctes, généralement exploitées en 4G ou 5G :

- la bande de fréquence 2,6 GHz TDD (2575–2615 MHz), partie de la bande b38/n38 dans la nomenclature 3GPP<sup>5</sup> ;
- la bande de fréquences 3,8–4,2 GHz, partie de la bande n77 dans la nomenclature 3GPP.

À noter que la seconde bande de fréquences fait l'objet d'une harmonisation à l'échelle de l'Union européenne qui devrait permettre l'émergence d'un écosystème d'équipements et de solutions répliquables à l'échelle des 27 États membres.

Ces deux bandes de fréquences font l'objet d'attribution d'autorisations individuelles et exclusives d'utilisation de fréquences sur une zone donnée, afin d'assurer une utilisation sans brouillage pour les titulaires des licences. En effet, contrairement aux bandes libres qui font l'objet d'une autorisation générale et peuvent être utilisées sans autre formalité à condition de respecter les conditions techniques qui leurs sont attachées, les conditions techniques d'utilisation des deux bandes mentionnées ci-dessus ne suffisent pas à assurer une coexistence libre de brouillage entre deux utilisations proches géographiquement. L'Arcep a ainsi défini des zones d'autorisation et des zones de coordination,

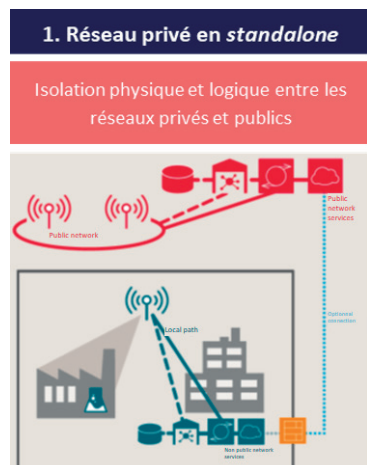
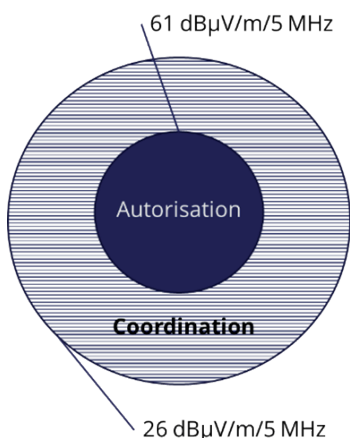


Figure 3 : Réseau privé autonome (Source : Arcep).

<sup>5</sup> Specification # 36.101 et Specification # 38.101-1.



fondées sur des limites de champ radioélectrique, qui permettent de maximiser l'utilisation géographique des fréquences au travers de la coordination technique des acteurs intéressés et d'assurer une utilisation sans brouillage.

Les modalités d'attribution des fréquences mises en place par l'Arcep<sup>6</sup> décrivent en détail les différentes étapes de la procédure de demande et les conditions techniques associées.

Figure 4 : Exemple des zones d'autorisation et de coordination pour la bande 3,8–4,2 GHz (Source : Arcep).

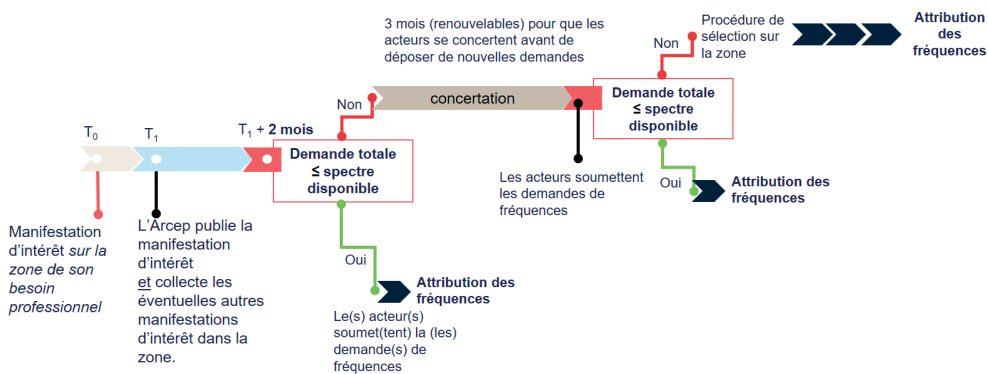


Figure 5 : Processus d'attribution des fréquences pour les réseaux à usage professionnel (Source : Arcep).

## Réseau dédié sur bande libre

Malgré l'émergence des solutions cellulaires à très haut débit pour répondre à leurs besoins, de nombreux acteurs restent utilisateurs des bandes libres et de la technologie *wifi*. Les évolutions de cette technologie, tant du point de vue des performances clés pour les usages professionnels que par les fréquences utilisables, en font une solution toujours adaptée à un grand nombre d'usages, notamment si la couverture étendue d'un site n'est pas nécessaire.

<sup>6</sup> Guichet d'attribution des fréquences de la bande 2,6 GHz TDD (Arcep), <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/entreprises/fiches-pratiques/transformation-numerique-des-entreprises/guichet-dattribution-des-frequences-de-la-bande-26-ghz-tdd.html>, et Guichet d'attribution des fréquences de la bande 3,8–4,2 GHz TDD (Arcep), <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/entreprises/fiches-pratiques/transformation-numerique-des-entreprises/guichet-attribution-frequences-bande-38-42-ghz-tdd.html>

À cet effet, le *wifi* dispose aujourd'hui en France et en cohérence avec le cadre radio harmonisé européen, des fréquences suivantes, utilisable sous le régime d'une autorisation générale, sans nécessité de demander une autorisation individuelle mais avec un plus gros risque de brouillage éventuel :

- 80 MHz dans la bande 2,4 GHz (y compris en extérieur) pour des canaux de 20 et 40 MHz. Cette bande est la première où le *wifi* s'est déployé ;
- 440 MHz<sup>7</sup> dans la bande 5 GHz (dont 240 MHz en extérieur) pour des canaux de 20 à 160 MHz, depuis 2014 ; dont 380 MHz sont standardisés IEEE 802.11 et utilisables en *wifi* (5170–5330 MHz + 5490–5725 MHz, soit 19 canaux de 20 MHz).
- 480 MHz dans la bande 6 GHz « inférieure » en intérieur uniquement pour des canaux de 20 à 320 MHz<sup>8</sup>, depuis décembre 2021.

## PERSPECTIVES

La numérisation de l'économie et des entreprises repose nécessairement sur une infrastructure de connectivité sous-jacente qui permet à la fois de centraliser des données captées en temps réel et de contrôler des processus d'activité, soit automatiquement soit en diffusant des informations aux personnels. La flexibilité des organisations et des processus, y compris ceux de production lourde, exige de la connectivité qu'elle ne soit pas un frein à des reconfigurations rapides des chaînes productives. Avec l'avènement des technologies de connectivité sans fil toujours plus performantes et fiables, il y a de fortes chances que ces dernières soient de plus en plus mobilisées dans le contexte des usages professionnels. La 6G pourrait certainement être la prochaine étape dans le développement de ces solutions et donner lieu dans le futur, le cas échéant, à des besoins supplémentaires de fréquences qui restent à déterminer.

---

<sup>7</sup> 340 MHz sont utilisables à condition d'utiliser un système dynamique de sélection de fréquences qui écoute en continu la bande de fréquences et n'émet pas dans les fréquences utilisées par des radars avoisinants.

<sup>8</sup> Les canaux de 320 MHz sont introduits à partir du *wifi7*.

# La 5G et la santé

Par Anne PERRIN

Expert-conseil indépendante

La 5G marque une évolution des communications mobiles vers des usages diversifiés du numérique. Son arrivée a suscité des interrogations et des inquiétudes, souvent amplifiées par des rumeurs ou des fausses informations. L'évaluation du risque lié à la 5G a fait l'objet d'attention dans de nombreux pays, dont la France. Elle s'appuie sur les connaissances scientifiques concernant les effets biologiques et sanitaires des radiofréquences. Ces données sont à la base de la réglementation pour la protection du public et des professionnels, elles permettent aussi d'identifier les besoins de recherche pour améliorer la connaissance et réduire les incertitudes résiduelles. Cet article fournit des bases pour s'approprier le sujet en soulignant ce qui différencie, ou non, la 5G des précédentes générations de communication sans fil ou d'autres sources d'exposition présentes dans notre environnement en termes de risque.

La 5G, symbole d'une société numérisée, a suscité des débats sur ses impacts scientifiques, techniques, économiques et sociaux, notamment en matière de santé et d'environnement. Elle marque une évolution des communications mobiles vers des usages diversifiés grâce à une vitesse accrue, une latence réduite et un réseau plus dense. Son arrivée a suscité des craintes légitimes, amplifiées par des rumeurs parfois surprenantes<sup>1</sup>, comme celles reliant la 5G à l'épidémie de Covid-19 en 2020<sup>2</sup>. L'évaluation du risque lié à la 5G fait l'objet d'attention dans de nombreux pays, dont la France. Elle s'appuie sur les connaissances scientifiques concernant les effets biologiques et sanitaires des radiofréquences. Ces données permettent de définir des limites d'exposition pour garantir la sécurité du public et des professionnels, et servent aussi à identifier les besoins de recherche pour améliorer la connaissance et réduire les incertitudes résiduelles.

L'objectif de cet article est de fournir des bases pour s'approprier le sujet en soulignant ce qui différencie, ou non, la 5G des générations précédentes ou d'autres sources d'exposition présentes dans notre environnement en termes de risque.

## UN SUJET SENSIBLE

On pourrait s'en tenir au fait que la 5G est réglementée pour protéger le public des risques liés aux champs électromagnétiques, et qu'à ce jour, les autorités sanitaires n'ont pas remis en cause les limites actuelles. Mais les ondes sont invisibles, le sujet reste mal compris et instrumentalisé pour divers enjeux : défendre une cause, vendre des prestations ou des soi-disant protections anti-ondes, devenir célèbre, s'opposer à l'implantation d'une antenne, aux nouvelles technologies ou au changement, satisfaire un électorat...

---

<sup>1</sup> POINT S. (2020), « Syndrome d'hypertoxicité Covid-5G : quand la science passe au bûcher », *SPS*, n°333, janvier-mars 2020, sur [afis.org](https://www.afis.org), <https://www.pseudo-sciences.org/Syndrome-d-hypertoxicite-Covid-5G-quand-la-science-passe-au-bucher>

<sup>2</sup> OMS (2020), "5G mobile networks DO NOT spread Covid-19, 4 mai 2020", sur [who.int](https://www.who.int), <https://www.who.int/multi-media/details/5g-mobile-networks-do-not-spread-covid-19>

Des informations inquiétantes sur les dangers de la 5G, et des champs électromagnétiques en général, sont toujours véhiculées dans les médias et les réseaux sociaux. Elles sont souvent fondées sur des allégations, des études isolées, ou une interprétation biaisée des incertitudes inhérentes à la science. De plus, la 5G a fait l'objet d'une campagne virulente de la part d'activistes qui se sont empressés de publier des pseudo-analyses de la littérature scientifique dès 2018 en soutien aux appels à moratoire contre la 5G (de Vocht et Albers, 2022). Faire la part des choses n'est pas toujours évident. Comme le soulignait le sociologue Olivier Borraz (2008), la controverse autour des antennes-relais et des champs électromagnétiques (CEM) fait partie des controverses à bas bruit qui ne demandent qu'à ressurgir quand les conditions sont propices (nouvelle technologie, tensions, conflits...). Ces inquiétudes ne sont pas confinées dans l'espace public. Elles se propagent aussi dans les entreprises au sein desquelles des CEM sont utilisés pour les communications sans fil ou des techniques industrielles<sup>3</sup>, et où la 5G est appelée à occuper une place grandissante. Cela peut conduire à des situations de crise, qui à leur tour, retentissent dans l'espace public grâce aux médias friands de sensationnel. Ce fut le cas à la RATP en 2012<sup>4</sup>, chez ATOS en 2020<sup>5</sup> pour ne citer que deux exemples. La gestion de crise à chaud n'est jamais simple. Il est donc important pour les professionnels utilisant la 5G d'anticiper pour s'appropriier le sujet afin de pouvoir répondre sereinement aux questions sur les risques encourus.

## CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES, RADIOFRÉQUENCES ET SANTÉ : DE QUOI PARLE-T-ON ?

### Les rayonnements électromagnétiques

D'origine naturelle ou artificielle, les rayonnements électromagnétiques peuvent être décrits comme des ondes électromagnétiques ou comme des flux de photons (modèle « corpusculaire »). Du point de vue ondulatoire, ils sont composés d'un champ électrique et d'un champ magnétique se propageant quasiment à la vitesse de la lumière depuis l'émetteur. Ces champs sont caractérisés par leur fréquence (nombre d'oscillations par seconde, en Hertz), leur longueur d'onde (en mètre) et leur intensité qui dépend de la puissance de la source (émetteur) (voir la Figure 1). Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite.

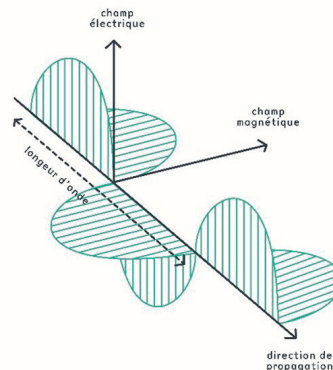


Figure 1 : Schéma d'une onde électromagnétique (Source : Perrin et Souques, EDP-Sciences, 2018).

<sup>3</sup> INRS, Sources d'exposition aux champs électromagnétiques, <https://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/sources-exposition.html>

<sup>4</sup> La polémique sur les ondes électromagnétiques rebondit dans le métro parisien, 9 février 2012, sur silicon.fr, <https://www.silicon.fr/Thematique/actualites-1367/Breves/La-polemique-sur-les-ondes-electromagnetiques-rebondit-dans-le-metro-431765.htm>

<sup>5</sup> Complément d'enquête (2020), « 5G : l'onde d'un doute », extrait #2, sur youtube.com, <https://www.youtube.com/watch?v=zdti1r21ZSQ>, et les répercussions dans l'espace public, [https://www.youtube.com/watch?v=T\\_olpm\\_b1pA](https://www.youtube.com/watch?v=T_olpm_b1pA)

## Les fréquences de la 5G

La 5G est une évolution par rapport aux précédentes générations de réseaux mobiles, dans la continuité de la 4G et l'apparition de nouvelles antennes dites intelligentes<sup>6</sup>. Les aspects techniques ne seront pas détaillés ici.

Dans l'espace public, elle utilise :

- plusieurs bandes de fréquences également exploitées par les réseaux mobiles 2G, 3G<sup>7</sup> et 4G, situées entre 700 MHz et 2,1 GHz ;
- une nouvelle bande dite « cœur » autour de 3,5 GHz (3,4–3,8 GHz), dont le déploiement est en cours depuis 2020 ;
- une bande autour de 26 GHz (24,2–27,5 GHz), dites ondes millimétriques, non déployée en France à ce jour.

Notons que le *wifi* utilise les fréquences 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz.

Dans l'industrie, des réseaux mobiles privés 5G sont déployées en bandes 2,6 GHz (2,57–2,62 GHz), 3,8–4,0 GHz et expérimentés dans la bande 26 GHz<sup>8</sup>.

## Les interactions ondes-matière, cas des radiofréquences

Du point de vue corpusculaire, les ondes sont des particules dont l'énergie augmente proportionnellement à la fréquence (énergie du photon)<sup>9</sup>. Les rayonnements ionisants (X, alpha, bêta, gamma, certains UV) peuvent créer des radicaux libres en arrachant des électrons<sup>10</sup>, tandis que les champs électromagnétiques radiofréquences (CEM-RF) font partie des rayonnements non ionisants et n'endommagent pas l'ADN (Nicolas, 2025). Leurs effets varient selon la fréquence (Perrin et Souques, 2018). Dans la gamme de fréquences des CEM-RF, l'absorption du rayonnement entraîne une agitation des molécules polaires, en particulier l'eau, provoquant un échauffement. Par exemple, la fréquence du *wifi* (2,4 GHz) est similaire à celle d'un four micro-ondes, mais sa puissance est bien moindre, ce qui montre que la puissance de la source est déterminante pour l'effet observé.

## Comment les CEM-RF interagissent-ils avec le corps humain ?

Les ondes sont en partie réfléchies (environ 50 % autour du GHz) et absorbées par les tissus biologiques. L'absorption dépend de nombreux paramètres : température, caractéristiques physico-chimiques de la matière, configuration, type de signal, etc. Plus la fréquence augmente, moins les ondes pénètrent. Par exemple, la profondeur de pénétration est réduite d'environ 40 % à 3,5 GHz par rapport à 900 MHz :

---

<sup>6</sup> Pour un aperçu rapide, voir Fiches techniques de la SFRP (2022), « La 5G et la santé », mise à jour 2025, sur [sfrp.asso.fr](https://sfrp.asso.fr), <https://sfrp.asso.fr/fiches-techniques-2/>

<sup>7</sup> Les réseaux mobiles 2G et 3G sont en cours d'extinction.

<sup>8</sup> Pour en savoir plus : Tableau de bord des expérimentations 5G industrielles et innovantes en France, sur [arcep.fr](https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-de-bord-des-experimentations-5g-en-france.html), <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-de-bord-des-experimentations-5g-en-france.html>

<sup>9</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=kYUEhvMt6Tw>

<sup>10</sup> Pour les rayonnements ionisants, hors champ de cet article, voir <https://annales-des-mines.org/les-rayonnements-ionisants-leurs-risques-et-leur-gestion/>

- En dessous de 6/10 GHz<sup>11</sup>, les ondes pénètrent dans les tissus. L'indicateur biologique de référence est le Débit d'Absorption Spécifique (DAS) qui représente la quantité d'énergie absorbée par unité de masse et de temps. C'est une grandeur interne qui s'exprime en watts par kilogramme (W/kg).
- Au-dessus de 6 GHz, l'absorption est superficielle, limitée à la peau. L'indicateur de référence est la densité de puissance absorbée (Sab), en W/m<sup>2</sup>.

Les effets connus des CEM-RF sur la santé proviennent de l'échauffement des tissus, appelés effets thermiques, qui surviennent au-delà d'un seuil critique d'énergie absorbée si l'élévation de température dépasse les capacités de thermorégulation du corps. Les premiers signes sont des troubles comportementaux chez les primates en exposition totale, ou des brûlures et cataractes lors d'expositions localisées, notamment à l'œil qui est peu vascularisé. Les seuils critiques de DAS sont de 4 W/kg pour le corps entier et 100 W/kg pour les expositions localisées. Au-dessus de 6 GHz, un échauffement superficiel apparaît à partir de 250 W/m<sup>2</sup> sur 20 cm<sup>2</sup>. Le risque dépend du niveau d'exposition. Les communications sans fil génèrent des niveaux d'exposition trop faibles pour provoquer ces effets thermiques.

## RÉGLEMENTATION POUR LA PROTECTION DES PERSONNES

### Principe de la réglementation et textes réglementaires

Dans de nombreux pays, les limites d'exposition sont définies par la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)<sup>12</sup>, organisme référence pour l'OMS<sup>13</sup> (cf. Figure 2). L'ICNIRP effectue une veille scientifique permanente sur les effets des rayonnements non ionisants.

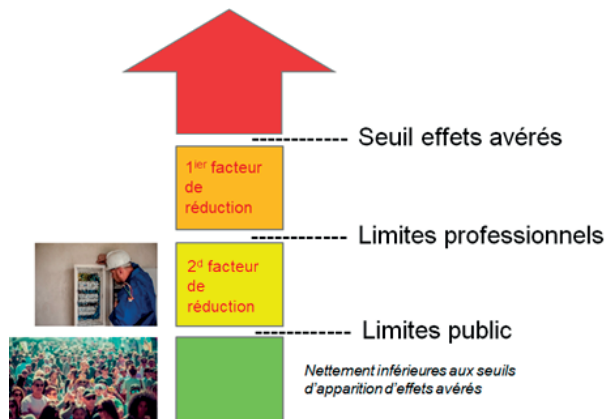


Figure 2 : Illustration du principe de la réglementation pour la sécurité sanitaire (création de l'auteur) (Crédits photos : Image « foule » [https://cdn.pixabay.com/photo/2020/04/22/09/04/crowd-5076714\\_960\\_720.jpg](https://cdn.pixabay.com/photo/2020/04/22/09/04/crowd-5076714_960_720.jpg) ; image « travailleur » <https://pixabay.com/fr/photos/%C3%A9lectricien-%C3%A9lectrique-%C3%A9lectricit%C3%A9-2755683/> par Michal Jarmoluk).

<sup>11</sup> La valeur de 10 GHz ou 6 GHz est prise en compte selon les textes réglementaires, 6 GHz est issu des travaux les plus récents sur les valeurs limites.

<sup>12</sup> <https://www.icnirp.org/en/home/home-read-more.html>

<sup>13</sup> <https://www.icnirp.org/en/home/home-read-more.html>

En France, le décret de 2002<sup>14</sup> pour la protection du public couvre les fréquences de 0 à 300 GHz, et donc la 5G (décret n°2002-775). Il reprend les valeurs de la Recommandation européenne de 1999<sup>15</sup>, alignée sur les lignes directrices de l'ICNIRP<sup>16</sup> (voir le Tableau 1). Il s'applique en tout lieu accessible au public. Par précaution, les limites réglementaires sont très inférieures aux seuils d'apparition des effets avérés afin de protéger l'ensemble de la population (50 fois inférieurs aux seuils critiques pour la tête et le corps). Les pays sont toutefois libres d'appliquer des seuils plus bas.

D'autre part, un décret de 2016<sup>17</sup> protège les travailleurs contre les risques liés au CEM<sup>18</sup>.

Tableau 1 : Valeurs limites d'exposition pour les CEM-RF figurant dans le décret du 3 mai 2002 (f est la fréquence en Hz) (Source : décret n°2002-775 du 3 mai 2002).

GAMME DES FRÉQUENCES	DENSITÉ de courant S (mA/m <sup>2</sup> ) (valeur efficace)	MOYENNE DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	DENSITÉ de puissance S (W/m <sup>2</sup> )
100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4	-
10-300 GHz	-	-	-	-	10

En 2020, l'ICNIRP a actualisé ses lignes directrices pour les CEM-RF (100 kHz à 300 GHz), maintenant les limites d'exposition en termes de DAS (ICNIRP, 2020). Des ajustements sont faits pour mieux prendre en compte de nouvelles technologies, entre autres par l'introduction de la densité de puissance absorbée (Sab) pour mesurer l'absorption superficielle<sup>19</sup>. D'après l'ICNIRP, les valeurs de 1998 demeurent une protection adaptée, y compris avec à les technologies 5G, dans la mesure où celles-ci produisent les niveaux d'exposition prévus, similaires à ceux des générations précédentes<sup>20</sup>.

<sup>14</sup> Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L.32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques, *Journal officiel de la République française*, 2002, 105:8624, sur [legifrance.gouv.fr](https://www.legifrance.gouv.fr), <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000226401>

<sup>15</sup> Conseil de l'Union européenne. Recommandation du Conseil (1999/519/CE), du 12 juillet 1999, relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A31999H0519>

<sup>16</sup> ICNIRP (1998), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, 74(4), pp. 494-522, <http://www.icnirp.de/PubEMF.htm>

<sup>17</sup> Décret n°2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques, *Journal officiel de la République française*, 2016, sur [legifrance.gouv.fr](https://www.legifrance.gouv.fr).

<sup>18</sup> Pour un aperçu rapide, voir Fiches techniques de la SFRP (2020), « Évaluer l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques », sur [sfrp.asso.fr](https://sfrp.asso.fr), <https://sfrp.asso.fr/fiches-techniques-2/>

<sup>19</sup> Les textes précédents considèrent la densité surfacique de puissance, également en W/m<sup>2</sup>.

<sup>20</sup> ICNIRP, "Frequently Asked Questions related to the ICNIRP RF EMF Guidelines 2020", sur [icnirp.org](https://www.icnirp.org)

Comme le DAS est une grandeur interne difficilement mesurable, les appareils portés près du corps doivent être calibrés en usine pour être conformes à la réglementation. Pour les émetteurs éloignés (antennes relais par exemple), la réglementation fournit des niveaux de références mesurables, garantissant que les limites d'exposition en DAS ne sont pas atteintes. L'exposition est classiquement évaluée à partir du champ électrique. Ces limites réglementaires varient selon la fréquence (voir la Figure 3).

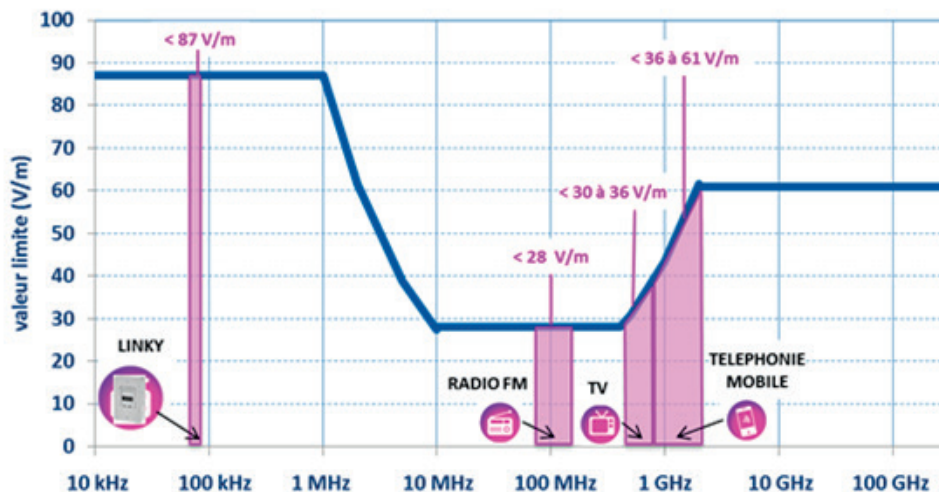


Figure 3 : Niveaux de référence réglementaires en fonction de la fréquence, en France (Source : ANFR).

## Exposition du public et 5G en France

Les mesures de l'Agence nationale des fréquences (ANFR) montrent que le niveau d'exposition ambiant généré par les communications sans fil, 5G comprise, reste majoritairement inférieur à 1 V/m sur le territoire (en 2024, moyenne 1,2 V/m, médiane de 0,48 V/m, *versus* 0,38 V/m en 2022 et en 2023)<sup>21</sup>. Ces valeurs sont très en-dessous des limites réglementaires ; par exemple, le niveau de référence à 3,5 GHz est de 61 V/m.

## L'ÉVALUATION DU RISQUE DES CEM-RF : QUOI DE NOUVEAU AVEC LA 5G ?

### Pourquoi des recherches sur les effets des CEM-RF ?

L'essor de la téléphonie mobile a suscité des inquiétudes sur l'innocuité des ondes radiofréquences à faible niveau d'exposition, notamment avec le téléphone portable placé contre la tête et des cas médiatisés de tumeurs cérébrales. Mais corrélation n'est pas causalité, il fallait élucider la question. Des recherches ont été initiées sur d'éventuels effets biologiques et sanitaires non thermiques des radiofréquences ne résultant pas d'une augmentation de température, qui pourraient survenir à de faibles niveaux d'exposition.

<sup>21</sup> Les rapports de mesures de l'ANFR sont disponibles sur [anfr.fr](https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/rapports-annuels-des-mesures), <https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/rapports-annuels-des-mesures>

Dès les années 1990, la recherche dans le domaine du bioélectromagnétisme a connu une forte activité mondiale, particulièrement dans les années 2000.

### De la recherche à l'évaluation du risque

Des études sur des cellules, des animaux et des humains ont été menées, ainsi qu'en dosimétrie biologique (spécialité en physique) qui ont permis de mieux maîtriser les expositions car il s'agit en quelque sorte de toxicologie pour tester l'effet d'agents physiques et non chimiques. La connaissance précise de l'exposition est essentielle, mais reste difficile à atteindre, notamment celle du DAS, valeur interne, qui nécessite des simulations numériques et des mesures techniques. En épidémiologie, le choix des métriques d'exposition est également fondamental pour garantir la fiabilité des résultats. Les équipes de recherche sont nécessairement pluridisciplinaires.

Des milliers de publications scientifiques sur les effets des CEM-RF sont répertoriées dans la base de données EMF-portal dédiée au bioélectromagnétisme. Depuis 2000, des expertises collectives évaluent l'état des connaissances et les risques en examinant minutieusement la qualité méthodologique des travaux publiés, écartant les études jugées non fiables (30 à 40 %). Dans ce domaine, une étude scientifique mal faite montre invariablement des effets dus à des biais, ce qui appelle à la prudence face aux résultats sensationnalistes ou aux allégations basées sur une sélection partielle des études.

## La question de la cancérogénicité des radiofréquences

Bien qu'aucun mécanisme expliquant l'impact des CEM-RF sur l'ADN n'ait été identifié, la question de leur effet potentiel sur l'intégrité génétique et la cancérogénèse a fait l'objet de nombreuses études. En 2011, le CIRC a classé les radiofréquences des téléphones mobiles dans la catégorie « peut-être cancérogène » ou « cancérogène possible » (groupe 2B)<sup>22</sup>. Celle-ci inclut également des substances courantes comme les légumes marinés à la chinoise ou l'Aloe Vera<sup>23</sup>. Notons que ce classement repose sur des preuves limitées ou des résultats incohérents, et qu'il est fréquemment mal compris : il ne signifie pas que l'agent est « cancérogène probable » (2A) ou « avéré » (groupe 1) et cherche à caractériser un danger sans statuer sur le risque. Ce classement a motivé un regain d'attention sur le sujet encouragé par l'OMS. En particulier, des études d'incidence<sup>24</sup> du cancer menées dans une quinzaine de pays à partir des registres nationaux n'ont pas montré d'augmentation des cancers cérébraux liée à l'usage du téléphone portable sur les périodes étudiées (jusqu'à 30 ans).

---

<sup>22</sup> Communiqué de presse du CIRC, 31 mai 2011, [https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208\\_F.pdf](https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_F.pdf) ; Rapport complet : CIRC, 2013, Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 102, <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Non-ionizing-Radiation-Part-2-Radiofrequency-Electromagnetic-Fields-2013>

<sup>23</sup> Le café, autrefois dans cette catégorie 2B, est désormais considéré comme « inclassable » (Groupe 3) par le CIRC. Listes des classifications : <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>

<sup>24</sup> Incidence = nombre de nouveaux cas par an pour 100 000 habitants. Ces études sont répertoriées dans les méta-analyses et les rapports d'expertise cités dans le chapitre sur la cancérogénicité.

Plusieurs expertises ont été menées depuis sans conclure à un effet cancérigène avéré des CEM-RF, nous n'en citerons que deux récentes. Une méta-analyse commandée par l'OMS n'a trouvée aucune preuve d'un lien entre l'exposition aux CEM-RF et les cancers de la tête, du cou ou des leucémies, notamment en ce qui concerne les téléphones mobiles (Karipidis *et al.*, 2024). D'après les auteurs, il y a des preuves solides que l'utilisation du téléphone mobile n'entraîne pas de cancers du cerveau, de la tête ou du cou, quel que soit le nombre d'appels ou le temps passé en communication, y compris s'il est utilisé depuis 10 ans et plus<sup>25</sup>. Un rapport récent de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES), fondé sur l'analyse de plus de 1 000 nouvelles études parues depuis les précédentes évaluations, indique qu'aucune association n'a été identifiée entre l'exposition aux radiofréquences et l'apparition de cancers (ANSES, 2025). Actuellement, le CIRC place la réévaluation de la classification des CEM-RF parmi ses priorités.

## Bilan des expertises « radiofréquences et santé »

Depuis une quinzaine d'années, les expertises collectives concluent de manière régulière et concordante à l'absence de risque avéré pour la santé et l'absence de preuve d'un mécanisme biologique plausible pouvant entraîner une pathologie, considérant généralement que si un risque existait, il était faible et limité à un usage très intensif du portable. On peut citer par exemple, les rapports produits en France (2013)<sup>26</sup>, aux Pays-Bas (2016)<sup>27</sup>, au Canada (2016)<sup>28</sup>, au niveau Européen (2015)<sup>29</sup>, en Australie (2017)<sup>30</sup>, en Suède (2020)<sup>31</sup>.

Il convient de garder en tête qu'il est impossible de prouver scientifiquement qu'un danger ou un risque n'existe pas. Il ne faut pas confondre risque (probabilité d'un danger selon l'exposition) et danger. Un risque est avéré si un effet nocif (danger) est prouvé, sinon on parle de risque non avéré.

---

<sup>25</sup> Le Pr Karipidis est directeur adjoint de l'Agence australienne de radioprotection et de sûreté nucléaire (ARPANSA) et vice-président de l'ICNIRP. Il a communiqué sur les résultats dans un langage clair (<https://www.arpansa.gov.au/who-review-finds-no-link-between-mobile-phone-use-and-brain-cancer>) et [https://theconversation.com/mobile-phones-are-not-linked-to-brain-cancer-according-to-a-major-review-of-28-years-of-research-237882?utm\\_source=linkedin&utm\\_medium=bylinelinkedinbutton](https://theconversation.com/mobile-phones-are-not-linked-to-brain-cancer-according-to-a-major-review-of-28-years-of-research-237882?utm_source=linkedin&utm_medium=bylinelinkedinbutton)).

<sup>26</sup> Anses, mise à jour de l'expertise Radiofréquences et santé, 2013, <https://www.anses.fr/system/files/AP2011sa0150Ra.pdf>

<sup>27</sup> Health council of Netherlands, Mobile phones and cancer, Part 3, Update and overall conclusions from epidemiological and animal studies, 2016, [https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2023/07/16RF-Pays-Bas-Mobile\\_Phones\\_Cancer\\_Part3-juin2016.pdf](https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2023/07/16RF-Pays-Bas-Mobile_Phones_Cancer_Part3-juin2016.pdf)

<sup>28</sup> Institut national de santé publique du Québec, Évaluation des effets sur la santé des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences, 2016, <https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2023/07/5RF-.pdf>

<sup>29</sup> SCENIHR (devenu Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks [[https://health.ec.europa.eu/scientific-committees/scientific-committee-health-environmental-and-emerging-risks-scheer\\_en](https://health.ec.europa.eu/scientific-committees/scientific-committee-health-environmental-and-emerging-risks-scheer_en)], SCHEER), Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), 2015, [http://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/docs/citizens\\_emf\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/docs/citizens_emf_fr.pdf)

<sup>30</sup> ARPANSA, Technical Report "Radiofrequency Electromagnetic Energy and Health: Research Needs, TR178, 2017, <https://www.arpansa.gov.au/research-and-expertise/technical-reports/radiofrequency-electromagnetic-energy-and-health-research>

<sup>31</sup> Scientific Council of Swedish Radiation Safety Authority (SSM), 2020:04 Recent Research on EMF and Health Risk, 2020, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/radiation-protection/2020/202004/>

## Les expertises dédiées pour la 5G

Qu'il s'agisse de 5G dans l'espace public ou en milieu professionnel, la problématique du risque est la même.

Dans le monde, plus d'une vingtaine d'instances sanitaires et de gouvernements étaient positionnés sur les questions sanitaires relatives à la 5G dès 2020. L'analyse de ces avis par une mission inter-inspections fait ressortir trois approches selon les pays (CGEDD, 2020) :

- dans les limites sécuritaires recommandées, l'absence d'effets sanitaires démontrés des CEM-RF en général « s'applique *de facto* à la technologie 5G » (Canada, États-Unis, Estonie, Israël, Lettonie, Norvège, Roumanie, Royaume-Uni et Nouvelle-Zélande) ;
- il est raisonnablement possible d'extrapoler les résultats acquis pour la 2G, la 3G et la 4G (Finlande) ;
- il est « nécessaire, au moins s'agissant des ondes millimétriques, d'aller au-delà des études réalisées sur les technologies 2G, 3G et 4G » (France, Corée du Sud, Allemagne, Suède, Suisse, Australie).

En 2021, l'ANSES titre son actualité<sup>32</sup> « 5G : pas de risques nouveaux pour la santé au vu des données disponibles » et met en consultation publique un rapport dédié. En 2022, le rapport et l'avis définitif confirment qu'aucun nouveau risque pour la santé n'est identifié avec la 5G selon les données disponibles. Ils précisent que l'exposition aux champs électromagnétiques restera similaire ou légèrement supérieure à celle des anciennes technologies pour les bandes 700 à 2,1 GHz et 3,5 GHz (ANSES, 2022). Pour la bande 26 GHz, l'agence observe une pénétration plus faible des ondes mais manque de données pour évaluer le risque. Elle recommande de poursuivre la surveillance des expositions et l'acquisition de connaissances, et souligne l'importance d'identifier les impacts environnementaux et sociétaux du numérique, auxquels la 5G va contribuer.

Concernant les fréquences millimétriques (> 6 GHz), l'Agence australienne de radio-protection et de sûreté nucléaire (ARPANSA) et l'Université de Swinburne ont examiné 138 études sur les fréquences millimétriques (> 6 GHz) en 2021, mais peu étaient de bonne qualité<sup>33</sup>. L'agence juge toutefois que les résultats restent cohérents avec les directives sanitaires nationales et internationales, qui considèrent que l'exposition du public aux ondes radio 5G à faible niveau n'est pas dangereuse. L'ANSES avait également conclu en 2012 que les scanners corporels d'aéroport (24–30 GHz) ne présentaient pas de risque aux niveaux réglementaires<sup>34</sup>.

Globalement, tous s'accordent sur l'importance de surveiller les niveaux d'exposition et de poursuivre des recherches pour enrichir le corpus de connaissances ou maintenir une veille scientifique, en particulier dans la gamme des ondes millimétrique où les données sont moins nombreuses. Pour autant, la faible pénétration de ces ondes, qui ne traversent pas la peau, et les faibles niveaux d'exposition générés par la 5G ne génèrent pas d'inquiétude particulière. Tous admettent que la 5G n'induit pas de risque nouveau ou n'a pas de raison d'en induire dans le respect du cadre réglementaire et vu les faibles niveaux d'exposition attendus ou mesurés.

---

<sup>32</sup> <https://www.anses.fr/fr/content/5g-pas-de-risques-nouveaux-pour-la-sante-au-vu-des-donnees-disponibles>

<sup>33</sup> ARPANSA (2021), "World-first reviews into 5G radio waves", 17 mars 2021, sur [arpansa.gov.au](https://www.arpansa.gov.au/news/world-first-reviews-5g-radio-waves), <https://www.arpansa.gov.au/news/world-first-reviews-5g-radio-waves>

<sup>34</sup> <https://www.anses.fr/system/files/AP2012sa0063Ra.pdf>

## CONCLUSION

Plus qu'un enjeu sanitaire, la 5G apparaît avant tout comme un enjeu de société, appelant un débat éclairé. Elle s'inscrit dans la continuité des générations précédentes de technologies de téléphonie mobile. À ce jour, aucune preuve scientifique ne permet de conclure à l'existence d'un risque sanitaire avéré des champs électromagnétiques radiofréquences, y compris ceux liés à la 5G, en dessous des limites d'exposition réglementaires en vigueur pour protéger la santé. Des recherches se poursuivent dans certains domaines selon les pays, ainsi qu'une veille au long cours avec l'étude de cohorte internationale COSMOS<sup>35</sup>. En Europe, il n'y a plus de grand programme de financement de recherches ciblé sur cette thématique, hormis en France.

La controverse autour de la 5G illustre l'écart fréquent entre risque évalué scientifiquement et risque perçu. La désinformation galopante favorisée par le numérique et les réseaux sociaux<sup>36,37</sup>, la médiatisation d'études non confirmées ou sorties de leur contexte<sup>38</sup>, et la complexité des notions de physique alimentent parfois des inquiétudes disproportionnées, d'où l'importance d'une information rigoureuse, transparente et pédagogique, distinguant clairement danger, risque, hypothèse et fait établi.

## BIBLIOGRAPHIE

ANSES (2022), « Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication "5G" et effets sanitaires associés, actualisant l'avis du 12 avril 2021 », sur [anses.fr](https://www.anses.fr/system/files/AP2019SA0006RA-2.pdf), <https://www.anses.fr/system/files/AP2019SA0006RA-2.pdf>

ANSES (2025), « Avis et rapport de l'Anses relatifs à l'expertise "radiofréquences et cancer" », sur [anses.fr](https://www.anses.fr/system/files/AP2016-SA-0176-RA.pdf), <https://www.anses.fr/system/files/AP2016-SA-0176-RA.pdf>

BORRAZ O. (2008), *Les politiques du risque*, Gouvernances, Ed. Sciences Po, Les presses, pp. 54-255.

CGEDD (2020), « Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires », Rapport, septembre 2020, [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Dploiement\\_5G\\_France\\_et\\_monde\\_aspects\\_techniques\\_et\\_sanitaires.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Dploiement_5G_France_et_monde_aspects_techniques_et_sanitaires.pdf)

DE VOCHT F. & ALBERS P. (2022), "The population health effects from 5G: Controlling the narrative", *Front Public Health*, 10:1082031, doi: 10.3389/fpubh.2022.1082031, PMID: 36600933, PMCID: PMC9806221, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9806221/>

ICNIRP (2020), "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)", *Health Phys*, 118(5), pp. 483-524.

<sup>35</sup> <https://www.iarc.who.int/fr/news-events/lancement-de-letude-cosmos-france/>

<sup>36</sup> Voir le rapport le rapport de l'Académie des Technologies, IA générative et mésinformation, décembre 2024, [https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/02/241213\\_IA\\_mesinformation.pdf](https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2025/02/241213_IA_mesinformation.pdf), et son complément de 2026.

<sup>37</sup> Voir le rapport commandé par le ministère de la Santé, des familles, de l'autonomie et des personnes handicapées, Information en santé. Bilan des forces et des faiblesses. Recommandations pour une stratégie nationale d'information et de lutte contre la désinformation en santé, janvier 2026, [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/rapport\\_information.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_information.pdf)

<sup>38</sup> Voir le dossier « Science et médias » de la revue *Science et Pseudo-sciences* n°323 de l'Association française pour l'Information scientifique, janvier-mars 2018, <https://www.afis.org/-323>

KARIPIDIS K., BAAKEN D., LONE T. *et al.* (2024), “The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies – Part I: Most researched outcomes”, *Environment International*, Vol. 191, 108983, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412024005695?via%3Dihub>

NICOLAS E. (2025), « Rayonnements non ionisants et rayonnements ionisants, des faux frères ? », *Responsabilité & Environnement*, n°117, janvier, pp. 10-14, <https://Annales-des-mines.org/wp-content/uploads/2024/12/RE-2025-01-Numero-complet-version-internetcouv.pdf>

PERRIN A. & SOUQUES M. (2018), *Champs électromagnétiques, environnement et santé*, 2<sup>e</sup> édition française - Ed. EDP-Sciences, Paris, 241 pages, <https://laboutique.edpsciences.fr/produit/1039/9782759822591/Champs%20electromagnetiques%20environnement%20et%20sante>

# La 5G professionnelle : un outil de compétitivité pour l'industrie et les services critiques

Par Viktor ARVIDSSON

Directeur Stratégie et Affaires publiques d'Ericsson France

Qu'est-ce que la 5G professionnelle ? En France, nous avons une tendance, de manière restreinte, à la voir comme la solution pour connecter les ateliers des usines, et à la réduire à la 5G industrielle.

Cette définition restrictive a son utilité et sert notre politique industrielle en s'attachant à concentrer les efforts sur un objectif fédérateur, absolument nécessaire et avec un bon potentiel ; néanmoins, la 5G professionnelle doit aussi être vue dans une acceptation plus large.

Au-delà de ces questions de définition, il nous paraît aussi utile d'aborder les questions d'architecture réseau, d'évolutions, de cas d'usage et de critères, ainsi que les freins au déploiement.

Le positionnement et les différences vis-à-vis du *wifi* nous paraissent aussi être des points importants, relevant aussi de décisions opérationnelles importantes des acteurs du secteur. Dans ce contexte, nous pouvons noter les avantages de la 5G pour la sécurité et la résilience, ce qui contribue réellement à faire de la 5G professionnelle une solution de confiance pour la compétitivité de nos industries et les services critiques.

## LES UTILISATEURS ET LES USAGES PROFESSIONNELS MULTIPLES

Il y a bien entendu les usages de connectivité du quotidien, messageries, visio-conférences, documents partagés en ligne... Ces usages paraissent anodins mais les besoins de débits et de latence sont supérieurs à la plupart des usages récréatifs et nécessiteront quelques dizaines de mégabits de débit, et les zones attendues pour le service vont en s'accroissant avec le télétravail, les déplacements, la mobilité, le nomadisme... et les multiples raisons pour lesquelles la fibre ne saura répondre à ce besoin. Ponctuellement, nous pouvons également voir apparaître des solutions 5G *indoor* en remplacement du *wifi*, pour des raisons de performances et de sécurité, par exemple (même si les freins naturels actuels seront, entre autres, la taille minimale du réseau pour justifier sa rentabilité).

Une grande catégorie regroupe les usages métier, ou critiques, sur de grandes surfaces et des pans entiers du territoire national, comme pour les transports (ferroviaire...), l'énergie (les réseaux de distribution électrique...). Ces besoins nécessitent de déployer un réseau dédié national/régional ou d'utiliser un réseau public mobile mais avec une qualité de service dédiée. Le besoin naissant, sur le segment transport, concerne en particulier le "digital airspace", c'est-à-dire en général l'espace aérien jusqu'à 3 000 mètres d'altitude. L'objectif est donc de coordonner et d'optimiser le trafic aérien de drones (de transport, de surveillance...) avec, entre autres, des hélicoptères, voire des taxis aériens.



Figure 1 : Usage dans le train (Source : Ericsson).



Figure 2 : Réseaux de distribution électrique (Source : Ericsson).

Les besoins de connectivité critiques des forces de sécurité ou des services de secours, sont également spécifiques. Ces besoins peuvent être servis par des réseaux dédiés ou l'utilisation des réseaux publics, assez naturellement cela peut être une combinaison des deux dans une approche hybride.



Figure 3 : Trafic aérien de drones (Source : Ericsson).



Figure 4 : Pompier (Source : Ericsson).

Les besoins industriels peuvent porter sur de grands sites dédiés, avec des zones souvent de plusieurs km<sup>2</sup>, comme des mines, des centres de logistique ou de transport (ports, aéroports) ou encore sur de grands sites de production (sidérurgie, énergie...). La spécificité est que le site est en général privé, que le *wifi* est incapable de répondre au besoin (avec une couverture en extérieur exigeante, y compris avec des “hand-overs” fluides et transparents) et donc que le “business case” est plus facile à trouver.



Figure 5 : Port (Source : Ericsson).

Les besoins industriels concernent aussi les sites plus petits. Les bénéfices de la 5G industrielle seront tout aussi importants, néanmoins le “business case” sera peut-être plus compliqué à évaluer comme la comparaison avec les alternatives en place peut se révéler plus longue et complexe.



Figure 6 : Entrepôt (Source : Ericsson).

## EXEMPLES DE CAS D'USAGE PRÉCIS RÉCURRENTS

### Le travailleur connecté

Un exemple, parmi d'autres, est la visseuse connectée en 5G, qui peut paraître légèrement incongrue pour un regard externe, mais qui apporte un certain nombre de bénéfices assez tangibles. Le vissage industriel concerne des éléments critiques comme des pièces d'un avion ou le bloc de freinage d'une voiture. Il est donc primordial d'avoir une traçabilité de ce qui a été fait, et donc de pouvoir enregistrer toute une série de paramètres lors de ce vissage, comme la tension, l'angle de vissage, l'humidité, l'identité du technicien... Ce processus est donc bien plus efficace si le même outil permet de faire toutes ces opérations et si la remontée des données peut être automatisée. Les ateliers industriels peuvent aussi être complexes pour les ondes radios avec des carlingues d'avion, par exemple, qui se comportent comme des cages de Faraday, ou encore un mix d'environnements intérieurs et extérieurs. La 5G aura alors de meilleures performances que le *wifi* dans ces cages de Faraday et fonctionnera parfaitement, avec des "hand-overs", dans des environnements plus grands et variés (certains vissages doivent par exemple se faire en extérieur et en fin du processus de production, ce qui devient alors compliqué en *wifi*).

### Le contrôle à distance d'engins/robots

À l'heure où la France relance son industrie minière (terres rares, lithium), ce cas d'usage, qui s'applique typiquement à l'industrie minière (mais pas seulement !), est d'intérêt. Dans une mine, un mode de fonctionnement assez classique est d'utiliser des explosifs pour dégager les minerais. Il en résulte naturellement des contraintes de sécurité assez fortes, en particulier sur la présence humaine à proximité pendant ces opérations, mais également après, dans l'attente que les fumées s'évacuent et que la zone soit sécurisée. Il est donc assez évident que des engins pilotés à distance peuvent fortement augmenter la productivité en s'affranchissant en partie de ces périodes d'inactivité. Les sites d'exploitation minière sont aussi, en général, sur de grandes surfaces, pour lesquelles le *wifi* est parfaitement inadapté.

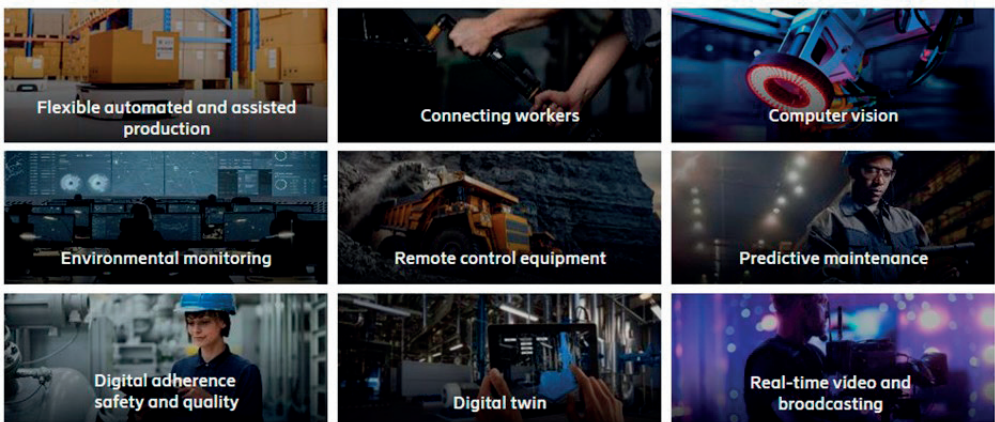


Figure 7 : Cas d'usage (Source : Ericsson).

## La maintenance prédictive

Les capteurs environnementaux (“Environmental monitoring” et “Predictive maintenance”), la multiplication de capteurs et la remontée d’information permettent d’optimiser le fonctionnement du site industriel (typiquement en termes de consommation énergétique) et également de mettre en place de la maintenance prédictive sur la base de ces données. Tous ces cas d’usage nécessitent une plus grande capacité du réseau télécom industriel, mais également de la flexibilité, ce à quoi la 5G répond également parfaitement.

## Les autres cas...

D’autres cas d’usage peuvent être rajoutés, comme l’utilisation de jumeaux numériques, l’automatisation de la production, les caméras et la vision informatique, la vidéo en temps réel, les contrôles qualité...

## CRITÈRES DE CHOIX ET LES FREINS ÉVENTUELS DANS LE DÉPLOIEMENT DE SOLUTIONS DE 5G PROFESSIONNELLE

### La dimension technique et le choix de l’architecture

Comme il a été évoqué ci-dessus, suivant les besoins de couverture, la solution choisie peut être plus ou moins dédiée, mais avant même d’en arriver là, la 5G professionnelle/industrielle peut être confrontée à des alternatives technologiques comme le *wifi* ou le filaire. En comparaison avec le *wifi*, la 5G sera clairement plus performante à partir d’une certaine échelle de déploiement et pour répondre à des besoins de performances accrues (mobilité, fiabilité, sécurité...).

### La richesse de l’écosystème, les fréquences

La disponibilité de terminaux répondant aux différentes attentes est un critère clé, et très clairement les améliorations sont permanentes. Les alternatives et différentes options spectrales s’enrichissent également.

### Les cas d’usage

Les cas d’usage, et en particulier, les bénéfices et RoI (retours sur investissement) qu’ils induisent sont évidemment un critère clé. Ce point est aussi intéressant parce qu’un certain nombre d’exemples montrent tout le bénéfice qui peut être retiré de ces déploiements, néanmoins ces données sont souvent des secrets industriels des différents acteurs, qui ont assez peu intérêt à s’étendre sur les détails. Le bénéfice le plus tangible peut aussi venir d’usages multiples, qui peuvent être difficiles à quantifier.

### Les contraintes opérationnelles

Les cycles industriels peuvent être plus longs que ceux des télécoms et de l’IT ; un décideur industriel peut donc vouloir s’inscrire dans un temps plus long pour la modernisation de son outil de production, et ce d’autant plus que les coûts et les risques associés peuvent être significatifs.

## COMPARAISON ENTRE LA 5G ET LE WIFI DANS UN CONTEXTE INDUSTRIEL

### Considérations générales sur la sécurité

Les arguments ci-dessous reviennent assez régulièrement comme des facteurs poussant au déploiement de la 5G industrielle :

- La coexistence avec les équipements d'anciennes générations : les entreprises exploitent souvent simultanément les normes *wifi* 4, 5 et 6. Les appareils *wifi* hérités sont déployés aux côtés d'équipements *wifi* de dernière génération et doivent communiquer entre eux à un niveau que tous les systèmes puissent comprendre, il est donc impossible de maintenir un niveau de sécurité homogène.
- L'effet domino des mises à niveau : planifier la modernisation du réseau *wifi* d'entreprise ne se limite pas au remplacement des contrôleurs ou des points d'accès, cela peut nécessiter un renouvellement complet des appareils/terminaux, ce qui représente des dépenses d'investissement cachées.
- Risque de propagation latérale : avec un grand nombre de points d'accès *wifi*, chacun géré individuellement et une absence d'isolation au niveau des appareils, il y aura un risque de propagation latérale entre les VLAN ou *via* des points d'accès mal configurés lors d'une attaque.

### Points spécifiques sur la sécurité

Sur la sécurité, on peut en particulier noter que :

- L'identification des terminaux, en *wifi*, est basée sur l'accès MAC (sensible au "spoofing"), alors qu'en 5G elle est basée sur l'IMSI/IMEI, avec un identifiant lié au terminal et porté par la SIM/eSIM.
- En 5G, L'authentification des utilisateurs sera également centralisée par l'opérateur ou l'entreprise *via* la SIM/eSIM. *A contrario*, en *wifi*, cela sera avec des clés ("pre shared keys", PSK) ou des certificats (WPA2-Enterprise, EAP), souvent gérés manuellement.
- Plus spécifiquement, sur nos équipements RAN dédiés à la 5G industrielle, il y a aussi une fonction pour lier l'IMEI à l'IMSI, gérée par l'administrateur de l'entreprise. Si la SIM de terminal est changée, il peut être fait en sorte que la connexion de cette SIM ne soit alors plus possible.
- La surface de vulnérabilité peut donc être plus importante en *wifi* avec un environnement plus hétérogène. La résistance à un certain nombre d'attaques ("passive sniffing", "rogue AP attacks") semble également meilleure en 5G avec une protection cryptologique des "user/control planes" et une signature encryptée des stations de base.

### Conclusions sur la sécurité

Le *wifi* reste une solution viable pour les environnements de type bureau à petite échelle ou à faible risque, mais s'avère fragile dans les contextes opérationnels critiques. Sur un plan plus opérationnel, la 5G offre également de bien meilleures performances en mobilité, en itinérance et en gestion/différenciation du trafic avec le "slicing".

La 5G privée offre :

- une architecture de sécurité supérieure (basée sur la carte SIM, SUCI chiffré, séparation cœur de réseau/RAN) ;
- une fiabilité accrue ("hand-over", mobilité, contrôle de la gigue) ;

- une évolutivité native et une conformité aux normes (3GPP, NIST, CEI 62443, préparation à la CRA de l'UE).

Le coût total de possession (TCO) de la 5G pourrait être inférieur (suivant la taille du réseau), sur 5 ans, grâce à une meilleure couverture par cellule, un MTTR (“mean time to repair”) plus faible et une gestion centralisée du cycle de vie.

En termes de perspectives stratégiques, et à plus long terme, nous notons en particulier :

- les entreprises devraient planifier l'intégration de la 5G, en particulier lorsque les AGV, la robotique ou les applications en temps réel sont essentiels ;
- la technologie 5G est mieux adaptée au déploiement dans des environnements plus exigeants, que l'on retrouve couramment dans la plupart des applications industrielles ;
- la 5G est mieux préparée pour l'avenir : des fonctionnalités telles que le “network slicing”, le positionnement en intérieur, les réseaux temps réels (TSN), les services critiques, etc. peuvent toutes être ajoutées *via* des mises à jour logicielles.

## LES ARCHITECTURES DE RÉSEAU

Les architectures doivent s'adapter aux différentes contraintes et priorités :

- La zone à couvrir, est-elle limitée à un site industriel ou doit-elle intégrer plusieurs sites distincts ? voire être nationale ?
- Les exigences en termes de performances, de résilience/fiabilité, de sécurité, de maîtrise/souveraineté des données. Quels sont les attentes en termes d'évolutivité ?
- L'offre de service, les usages et les utilisateurs, quel est leur profil et leur diversité ?
- Le coût, la ventilation entre les “opex” et les “capex”.

En pratique les choix d'architectures réseau peuvent se décliner de la manière suivante :

- Avec des solutions dédiées et parfaitement autonomes.
- Des solutions s'appuyant sur les réseaux publics des opérateurs, avec par exemple l'utilisation de *slices* dédiés pour garantir la qualité de service souhaitée.
- On peut aussi imaginer plusieurs variantes hybrides entre ces deux cas, avec un réseau radio dédié au site industriel (en particulier si le réseau public n'offre pas la couverture souhaitée). Le cœur de réseau peut également avoir un local “break out” avec la capacité de conserver en local, sur le site industriel, une partie du trafic et un certain nombre de fonctions.
- Plus spécifiquement, les architectures ouvertes sur les interfaces radio peuvent aussi permettre d'envisager de localiser sur le site industriel les antennes et les “radio units”, puis de regrouper les bandes de base (“baseband units”) de manière plus centralisée (avec un certain nombre de bénéfices associés). Il est également possible, dans les architectures plus ouvertes, de séparer la “baseband unit” en DU (“digital unit”) et CU (“central unit”). La CU acceptant des temps de latence un peu plus élevés, on pourrait imaginer une granularité différente pour les CU et DU. Néanmoins, les utilisateurs industriels sont avant tout à la recherche de solutions fiables et éprouvées et ne seront sans doute pas les premiers à tester de nouvelles architectures (qui peuvent rajouter de la complexité, des incertitudes sur les responsabilités respectives et, dans un premier temps, des performances plus faibles).

Sans que ce soit le sujet spécifique de cet article, il est aussi à noter que les évolutions technologiques, comme la 6G, vont permettre d'enrichir et de développer les usages.

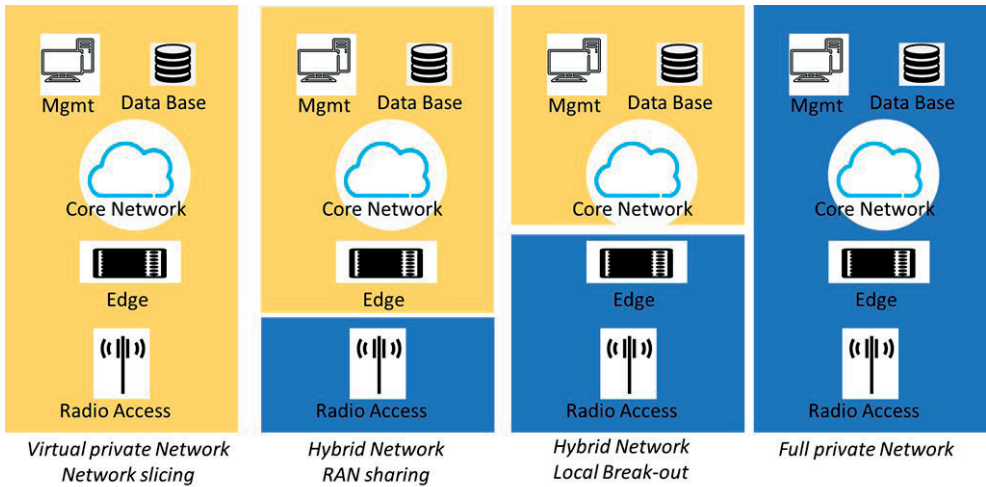


Figure 8 : Architectures de réseau (Source : Ericsson).

La 6G, qui est en cours de standardisation et de développement, met en avant des évolutions dans un certain nombre de domaines applicables à l’usage industriel et professionnel, comme :

- les environnements et les expériences immersives ;
- la mobilité autonome ;
- les jumeaux numériques ;
- l’exposition des données spatiales, y compris avec des applications de “sensing” (ISAC, “integrated sensing & communication”), qui permettent par exemple une gestion plus efficace et intégrée d’environnements complexes, comme l’utilisation de drones pour différents besoins de transport ou de surveillance.



<p><b>Mixed Reality – Immersive shared experiences</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Differentiated connectivity</li> <li>• Capacity (high user density) and high UL/DL rates</li> <li>• Latency needs to be robust</li> <li>• Wide-area contiguous service</li> <li>• Using Spatial data &amp; DT for spatial mapping, and compute/AI offload</li> <li>• Interworking with app platforms</li> </ul> <p>B2C / B2B2X</p>	<p><b>Autonomous Mobility – Supporting smart transport</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Predictable time-critical communication and high service availability with E2E service guarantees (SLA &amp; observability)</li> <li>• Resilient &amp; observable service delivery</li> <li>• Ubiquitous 3D connectivity ground + air</li> <li>• Inter-machine communication</li> <li>• Using Spatial data &amp; DT for spatial mapping, and compute/AI offload</li> </ul> <p>B2B/B2B2X</p>	<p><b>Resilient Connectivity – Priority emergency communication</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• E2E service guarantees (SLAs)</li> <li>• Efficient service-tailored resilience</li> <li>• Seamless coverage including fallback NW (e.g. NTN)</li> <li>• Recovery – self-healing NW using AI-powered automation</li> <li>• Observability for SLA tracking and prediction/automation</li> </ul> <p>B2B/B2B2X</p>	<p><b>Spatial Data – Exposing data related to coordinates</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Using ISAC, Positioning, Timing &amp; Compute/AI</li> <li>• Platform service B2B2X offered as API to e.g. Mixed Reality apps or assisted vehicles</li> </ul> <p>B2B2X</p>	<p><b>Massive Digital Twin – Data collection, management and modeling</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Using native Massive IoT &amp; Compute/AI</li> <li>• Platform service B2B offered as API to Enterprises, supporting e.g. Collaborative Robots &amp; Connected processes</li> </ul> <p>B2B2X</p>
--	---	---	--	---

Figure 9 : La 6G (Source : Ericsson).

## CONCLUSION

Face à ces différents enjeux, il paraît donc important d'accompagner le déploiement de la 5G professionnelle avec une politique industrielle d'accélération et de massification, le rythme naturel étant très probablement trop lent par rapport à la vitesse de transformation globale à laquelle nous sommes confrontés.

Comme on peut le dire de manière un peu prosaïque, ce n'est pas dans un pays sans route qu'on inventera les meilleures voitures... De même, des réseaux 5G solides constituent aussi une bonne base pour développer une 5G professionnelle efficace et impactante.

La 5G professionnelle est un outil de compétitivité et d'innovation, et dans ce contexte, le déploiement de l'IA ne fera que renforcer l'importance de la connectivité. Cette 5G professionnelle est aussi un outil extrêmement performant pour la transition environnementale. Nous tenons aussi à insister sur le terme « d'outil », et c'est bien en l'utilisant de la bonne manière qu'elle saura accompagner et accélérer cette transition environnementale.

# Vers une cybersécurité comportementale des réseaux 5G privés industriels

Par Cédric THIÉNOT

Directeur scientifique de Firecell

L'essor des réseaux 5G privés dans les environnements industriels s'accompagne d'une transformation profonde des enjeux de cybersécurité. La multiplication des équipements connectés, la virtualisation des fonctions réseau et l'introduction du *network slicing* complexifient la détection des menaces. Les approches traditionnelles, fondées sur l'authentification des équipements et l'analyse du trafic, montrent leurs limites face à des attaques exploitant des comportements en apparence légitimes. Cet article met en évidence l'intérêt d'une approche comportementale fondée sur l'intégration d'un système de détection d'intrusion (IDS) au cœur de l'architecture 5G, capable d'analyser le trafic, la mobilité et les usages, et de déclencher des actions de remédiation adaptées, automatiques ou supervisées.

## UNE TRANSFORMATION DES ARCHITECTURES RÉSEAU ET DES SURFACES D'ATTAQUE

En 2017, à Las Vegas, un incident de cybersécurité met en évidence une faiblesse structurelle des environnements connectés. Un thermomètre installé dans un aquarium, connecté au réseau *wifi* d'un casino pour transmettre des mesures de température, est compromis et détourné de son usage initial. Sans générer d'alerte, il commence à produire un trafic anormal, caractérisé par des volumes de données significativement supérieurs à son profil nominal et des communications vers des destinations externes non attendues. L'équipement devient alors un point d'entrée dans le système d'information et un vecteur d'exfiltration de données.

Cet incident illustre la difficulté à détecter une anomalie lorsque le comportement d'un équipement dérive sans violer explicitement les règles d'accès.

Avec l'émergence des réseaux 5G privés, cette problématique change d'échelle. Les architectures 5G reposent sur une virtualisation avancée des fonctions réseau, une séparation du plan de contrôle et du plan de données, ainsi qu'une programmabilité accrue du cœur de réseau [1]. Le *network slicing*<sup>1</sup> [4] permet de créer des réseaux logiques dédiés à des usages spécifiques, adaptés aux contraintes industrielles.

---

<sup>1</sup> Il consiste à segmenter un réseau 5G+ en plusieurs réseaux virtuels indépendants, appelés "slices" ou tranches. Chaque tranche est ainsi configurée pour répondre à des exigences spécifiques de bande passante, de latence et de sécurité, ce qui permet de l'optimiser pour un usage particulier, avec une qualité de service, une gestion des priorités de trafic, et une disponibilité dynamique des ressources adaptées.

Cependant, cette flexibilité s'accompagne d'une complexité accrue. Le réseau devient dynamique, distribué et fortement hétérogène. Les équipements apparaissent, disparaissent, se déplacent et interagissent dans des contextes variés, ce qui rend plus difficile l'identification des comportements anormaux.

## LES LIMITES DES APPROCHES TRADITIONNELLES

Les mécanismes de cybersécurité traditionnels reposent principalement sur l'authentification des équipements et la surveillance du trafic. Dans les réseaux 5G, l'authentification est assurée *via* la carte SIM, qui constitue l'identité réseau du terminal. La segmentation des usages *via* les nœuds de réseau de données (ou *Data Network Node*, DNN en anglais) permet de restreindre les accès et de cloisonner les flux.

Toutefois, ces mécanismes ne garantissent pas l'intégrité du comportement. Une carte SIM peut être déplacée, échangée ou compromise, rendant incertaine la correspondance entre identité réseau et équipement physique. Un terminal peut ainsi être correctement authentifié tout en étant détourné de son usage initial. De même, un équipement peut rester dans son périmètre autorisé tout en adoptant un comportement malveillant.

La segmentation des usages limite les interactions, mais ne permet pas de détecter une dérive interne. Un équipement compromis peut ainsi continuer à fonctionner sans déclencher d'alerte si son trafic reste proche d'un profil attendu.

Dans ce contexte, la notion de confiance doit être reconsidérée, notamment dans des environnements multi-acteurs où la responsabilité est fragmentée, conformément aux principes des architectures Zero Trust [2]. Ces limites montrent la nécessité de dépasser une approche fondée uniquement sur l'identité et le trafic.

## INTÉGRATION D'UN IDS DANS LES ARCHITECTURES 5G

Face à ces enjeux, l'intégration d'un système de détection d'intrusion (IDS) directement au sein de l'architecture 5G constitue une évolution structurante.

Cet IDS s'inscrit dans une logique d'observation continue du réseau. Il collecte des données issues du plan de données, *via* l'analyse du trafic, ainsi que du plan de contrôle, *via* les fonctions du cœur de réseau. Il exploite également des informations issues des systèmes de gestion et d'orchestration.

L'originalité de l'approche repose sur la corrélation de plusieurs dimensions. L'analyse du trafic permet d'identifier des variations anormales de volume, de fréquence ou de destination. L'analyse de la mobilité physique, *via* les changements de cellule, permet de détecter des déplacements incohérents. L'analyse de la mobilité logique, liée à l'accès aux *slices* et aux DNN, permet de caractériser les usages. En combinant ces dimensions, il devient possible de construire un modèle comportemental des équipements.

L'apprentissage de ces modèles repose sur des techniques d'intelligence artificielle, capables d'identifier des *patterns* récurrents et de modéliser le comportement nominal des équipements [3]. Cette approche permet de prendre en compte la variabilité des usages tout en définissant des référentiels dynamiques.

Les équipements peuvent ainsi être regroupés en catégories homogènes d'UE<sup>2</sup>, correspondant à des profils fonctionnels similaires. Chaque catégorie est associée à un ensemble de caractéristiques comportementales attendues. Lors de l'introduction d'un nouvel équi-

---

<sup>2</sup> C'est le terme standard de la 3GPP (norme télécoms) pour désigner tout équipement utilisateur connecté au réseau : smartphone, tablette, machine industrielle, capteur IoT, visseuse connectée, etc.

pement dans le réseau, il devient possible de lui associer une catégorie existante, soit à partir de son profil déclaré, soit à partir de ses premiers comportements observés. Cette association permet de disposer immédiatement d'un modèle de référence. Toute déviation significative par rapport au comportement attendu de la catégorie peut ainsi être détectée dès les premières interactions. Un équipement compromis peut être identifié très rapidement, y compris dans les phases initiales de son intégration.

Lorsqu'une anomalie est détectée, l'IDS évalue le niveau de risque et déclenche des actions adaptées. Il peut générer des alertes à destination des opérateurs ou agir directement sur le réseau. Les actions possibles incluent la restriction de la connectivité, le basculement vers un *slice* isolé, ou la désactivation de la carte SIM afin de bloquer tout accès.

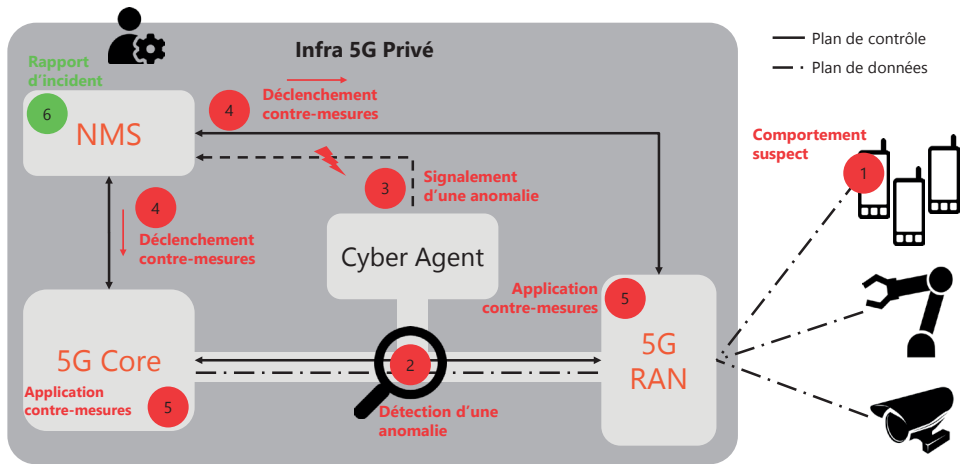


Figure 1 : Processus automatisé de détection et de réponse aux anomalies dans une infrastructure 5G privée (Source : Firecell, CEA – Direction de la Recherche Technologique (DRT), présentation interne : “Cyber 5G-AI Kick-off”, Romain Lahorre, 2026).

La Figure 1 présente une architecture fonctionnelle de ce processus, illustrant la chaîne complète allant de la détection des comportements suspects à l'application de contre-mesures au sein du réseau.

Cette capacité à intervenir au niveau du cœur de réseau constitue une différence majeure par rapport aux approches traditionnelles.

Les travaux de l'ETSI mettent en évidence le rôle de l'intelligence artificielle dans la détection d'anomalies au sein des réseaux 5G [3]. Le présent article s'inscrit dans cette perspective en proposant une approche opérationnelle fondée sur l'intégration d'un IDS au cœur de l'architecture 5G, enrichie par une analyse comportementale multidimensionnelle et des mécanismes de catégorisation des équipements permettant une détection précoce des anomalies dès leur insertion dans le réseau.

Les équipements peuvent ainsi être regroupés en catégories homogènes d'UE, associées à des profils comportementaux. Lors de l'introduction d'un nouvel équipement dans le réseau, celui-ci peut être associé à une catégorie existante, permettant de disposer immédiatement d'un modèle de référence.

## **ENVIRONNEMENTS INDUSTRIELS : UNE CONFIANCE FRAGMENTÉE**

Dans les réseaux 5G privés industriels, la notion de confiance est intrinsèquement limitée. Le réseau est utilisé par une multiplicité d'acteurs, et les équipements peuvent être manipulés, déplacés ou reconfigurés. Leur cycle de vie est complexe et difficile à maîtriser.

Dans ce contexte, un équipement peut être légitime du point de vue du réseau tout en étant compromis. Une visseuse connectée, par exemple, peut continuer à fonctionner dans son périmètre tout en générant des communications anormales ou en tentant d'interagir avec d'autres systèmes.

L'analyse comportementale permet de détecter ces situations en identifiant des écarts par rapport à un modèle attendu. Cette approche est particulièrement adaptée aux environnements industriels, où les comportements sont souvent répétitifs.

## **DE LA DÉTECTION À LA RÉSILIENCE : ENJEUX OPÉRATIONNELS ET ÉCONOMIQUES**

L'identification d'une anomalie ne constitue qu'une première étape. La capacité à réagir de manière adaptée est déterminante. Dans les environnements industriels, les actions de remédiation doivent concilier la gestion du risque et la continuité des opérations. Cela implique de pouvoir ajuster le niveau d'automatisation des réponses en fonction du contexte.

La réduction du temps entre la détection et la remédiation constitue un facteur clé de résilience. Sur le plan économique, la cybersécurité apparaît comme un levier d'adoption des réseaux 5G privés. En réduisant les risques d'incident et leurs impacts, elle renforce la confiance des entreprises et facilite les décisions d'investissement. Elle contribue également à améliorer la performance opérationnelle en limitant les interruptions et les faux positifs.

## **TYPOLOGIE DES MENACES DANS LES RÉSEAUX 5G PRIVÉS INDUSTRIELS**

Les réseaux 5G privés déployés dans les environnements industriels sont exposés à une diversité de menaces résultant à la fois de la nature ouverte des communications radio et de la complexité croissante des architectures numériques. La combinaison d'équipements hétérogènes, de fournisseurs multiples et de cas d'usage critiques accroît significativement la surface d'attaque et rend nécessaire une compréhension structurée des risques encourus.

Une première catégorie de menaces concerne les accès non autorisés. Ceux-ci peuvent résulter d'intrusions physiques, telles que le vol ou la manipulation d'équipements connectés, mais également d'intrusions logiques, par compromission de clés d'authentification ou exploitation de vulnérabilités logicielles. Dans un réseau 5G privé, la présence d'une carte SIM ne garantit pas à elle seule la légitimité d'un équipement. Les attaques par déni de service viennent compléter ce spectre en visant à saturer les ressources réseau.

Une seconde catégorie regroupe les menaces liées à la compromission des données. Celles-ci incluent le vol d'informations, l'altération des données ou l'injection de commandes malveillantes. Dans un contexte industriel, ces attaques peuvent avoir des conséquences directes sur les processus physiques.

Enfin, une troisième catégorie concerne les atteintes à la disponibilité et à l'intégrité du réseau, pouvant entraîner des interruptions de production ou des dégradations de service.

Au-delà de cette classification, ces menaces ont en commun de reproduire des comportements apparemment légitimes afin d'échapper aux mécanismes de détection traditionnels. Cette évolution renforce la nécessité d'approches comportementales. C'est précisément dans cette perspective que s'inscrit l'intégration d'un IDS au cœur des réseaux 5G privés, permettant de détecter et de qualifier ces dérives en temps réel.

## CONCLUSION

La généralisation des réseaux 5G privés impose une évolution des approches de cybersécurité. Dans des environnements complexes, dynamiques et fortement distribués, la seule vérification de l'identité et du trafic ne suffit plus à garantir l'intégrité des systèmes.

Comme proposée dans les solutions de Firecell, l'intégration d'un IDS basé sur une analyse comportementale multidimensionnelle, enrichie par des techniques d'intelligence artificielle, permet de détecter des anomalies invisibles autrement et de renforcer la résilience des infrastructures industrielles. En combinant observation, apprentissage et capacité d'action, cette approche ouvre la voie à des systèmes de sécurité plus adaptatifs, capables de s'ajuster en permanence aux usages réels du réseau.

Au-delà de la seule détection des menaces, cette évolution traduit un changement plus profond : le passage d'une cybersécurité fondée sur le contrôle à une cybersécurité fondée sur la compréhension des comportements. Dans un contexte industriel où la connectivité devient un élément structurant des processus, cette capacité à anticiper et à qualifier les dérives constitue un enjeu central.

Elle préfigure enfin des architectures de réseau où la sécurité n'est plus un mécanisme périphérique, mais une fonction intrinsèque, intégrée au fonctionnement même du système et à son pilotage opérationnel.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] 3GPP (2024), "System Architecture for the 5G System (5GS), TS 23.501", Juillet.
- [2] NIST (2020), "Zero Trust Architecture".
- [3] ETSI (2021), "Securing Artificial Intelligence – Anomaly Detection for 5G Networks".
- [4] NGMN Alliance (2016), "Description of Network Slicing Concept".

# Les satellites en orbite très basse : la nouvelle frontière de la 5G professionnelle

Par Pierre POPINEAU

Univerty, France

Les réseaux mobiles terrestres atteignent aujourd'hui leurs limites face à l'explosion mondiale des besoins en connectivité. Les réseaux non terrestres (NTN), intégrés aux standards 5G, proposent une nouvelle approche en utilisant des constellations de satellites en orbite basse ou très basse pour compléter les infrastructures terrestres. Après un rappel de l'évolution des réseaux satellitaires, de l'orbite géostationnaire aux constellations LEO modernes, cet article présente les principaux défis liés à l'intégration des réseaux terrestres et non terrestres (TN/NTN) : réduction de la latence, gestion des *handovers*, synchronisation, allocation spectrale et coûts de déploiement. Il met également en lumière l'émergence d'un nouvel écosystème industriel mêlant spatial et télécommunications, ainsi que les enjeux européens de souveraineté numérique autour des futures infrastructures 5G et 6G nativement spatiales.

Au cours de la dernière décennie, l'explosion de la demande en connectivité est devenue un enjeu critique au niveau mondial : le développement de l'IoT<sup>1</sup>, que ce soit dans les sites industriels ou à des fins commerciales ou récréatives, l'arrivée de déploiements massifs d'objets connectés, la demande croissante de connectivité haut débit par la téléphonie mobile, ou encore des réseaux véhiculaires, poussent les opérateurs de réseaux à développer de nouvelles solutions pour gérer cette charge.

Chronologiquement, les réseaux 4G, puis LTE-Advanced, ont commencé à proposer des architectures réseau novatrices par rapport aux réseaux 3G, en permettant des débits beaucoup plus élevés, une latence moindre et des solutions de type MIMO/massive-MIMO<sup>2</sup>, améliorant l'efficacité spectrale, les débits et la capacité des cellules radio. Ces solutions ont ensuite été rendues plus robustes et plus efficaces avec l'arrivée de la 5G, qui propose encore plus de flexibilité dans l'allocation des ressources radio afin de permettre une meilleure connectivité.

Mais les réseaux terrestres possèdent des limitations intrinsèques qui ne sauraient être surpassées sans un changement total de paradigme : la présence de zones blanches, qui ne peuvent pas être couvertes par des antennes ou à des coûts très élevés (vallées encaissées, zones à faible peuplement, zones maritimes) ou les demandes de connectivité en mobilité (aérienne, ferroviaire, navale) croissantes. Les opérateurs de réseau 5G doivent trouver de nouvelles idées pour répondre à ces problématiques.

---

<sup>1</sup> Internet of Things.

<sup>2</sup> Multiple Input - Multiple Output – une architecture permettant d'utiliser plusieurs antennes en émission/réception pour connecter plus de terminaux sur une même station sol.

## LES RÉSEAUX SATELLITAIRES COMME EXTENSION DU RÉSEAU TERRESTRE

Les premiers réseaux de communication satellitaires sont étroitement liés à la conquête spatiale. D'abord militaire, puis ouvert à des usages commerciaux dès la fin des années 1960, le spatial peut proposer une solution aux problématiques que rencontrent les réseaux terrestres ; en ajustant correctement les orbites des satellites, il est possible de proposer une couverture satisfaisante de zones inaccessibles aux réseaux terrestres.

Les premières entreprises de télécommunication spatiale proposaient des communications satellitaires mêlant communications téléphoniques et chaînes de télévision avec des satellites en orbite géostationnaire. Immobiles dans le référentiel terrestre, il suffisait de correctement pointer son antenne parabolique pour recevoir du signal. Mais, ces technologies restaient limitées ; à près de 36 000 km d'altitude, la latence dans les communications était importante (souvent supérieure à une demi-seconde en aller-retour), et les coûts de lancement limitaient le nombre d'acteurs potentiels sur le marché, avec des prix élevés.

Malgré des coûts encore très élevés, la fin des années 1990 voit apparaître les premières constellations LEO et marque le début de la démocratisation des réseaux de téléphonie *via* satellite (avec notamment Iridium et Globalstar). Mais ces réseaux nécessitent des terminaux spécifiques et utilisent des bandes de fréquences dédiées aux communications spatiales (bandes L et S dans le cadre du service MSS<sup>3</sup>) avec de faibles débits, ce qui limite grandement leur utilisation.

En parallèle, les premières études sur l'intégration de réseaux terrestres (TN<sup>4</sup>) et non terrestres (NTN<sup>5</sup>) sont menées, avec pour but d'unifier les architectures et d'envisager les réseaux satellitaires comme une extension des réseaux mobiles terrestres. Cet essor s'est matérialisé dans les années 2010 avec l'introduction du concept de réseau NTN dans les travaux du 3GPP<sup>6</sup>, prévu pour 2017.

La *release* 17<sup>7</sup> du 3GPP, seconde *release* après l'introduction de la 5G, définit explicitement les réseaux 5G NTN comme « des réseaux 5G utilisant des véhicules spatiaux (satellites) ou aériens (drones) pour fournir des services de communication<sup>8</sup> ». Cette définition vient ancrer les réseaux non terrestres dans l'écosystème des réseaux de télécommunications et jette les bases de l'intégration complète entre réseaux satellitaires et terrestres.

## LES DÉFIS DE L'INTÉGRATION TN-NTN

L'intégration des réseaux terrestres et non terrestres présente de nombreux défis technologiques, donc beaucoup n'ont pu commencer à être abordés que très récemment, avec les progrès des technologies du spatial.

---

<sup>3</sup> Mobile Satellite Service.

<sup>4</sup> Terrestrial Networks.

<sup>5</sup> Non-Terrestrial Networks.

<sup>6</sup> 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project – un consortium international regroupant l'Union Internationale des Télécommunications et la majorité des organismes normatifs et des acteurs privés du monde de télécommunications pour définir les protocoles de télécommunication mobile. Il est notamment à l'origine des normes "G" comme la 4G ou la 5G.

<sup>7</sup> Le 3GPP publie périodiquement les dernières versions de ses protocoles de communication sous forme de *release*.

<sup>8</sup> 3GPP - NTN - overview, <https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview>

Le premier, qui est de taille, provient de l'équilibre à trouver entre nombre de satellites, altitude, couverture mondiale et coûts de production et de lancement. Plus un satellite est éloigné de la Terre, plus sa zone de couverture est vaste (le rayon du disque de couverture dépend directement de l'altitude du satellite).

INTELSAT propose une couverture mondiale avec un faible nombre de satellites en orbite géostationnaire, mais ces plateformes sont grosses (de l'ordre de 5 tonnes), complexes à produire et extrêmement coûteuses. À cela, il faut ajouter le coût de mise en orbite – il faut utiliser des lanceurs lourds que seuls quelques acteurs sont en mesure de produire et d'opérer. Enfin, le dernier point négatif est la latence (très élevée du fait de la distance du satellite au sol), ainsi que le débit, relativement faible par rapport à un réseau terrestre.

Les progrès dans les technologies spatiales, plus particulièrement l'introduction des lanceurs réutilisables sur des segments commerciaux par SpaceX dans les années 2010, ont fait chuter drastiquement le coût des lancements et ont totalement ouvert les orbites basses (LEO et VLEO<sup>9</sup>) pour la mise en service de satellites de télécommunications. Cette rupture, avec l'introduction massive de lanceurs réutilisables, a permis la mise en service de Starlink, la première méga-constellation de satellites en orbite basse, avec des plans orbitaux entre 410 et 580 km d'altitude. La contrepartie de l'abaissement des orbites des satellites est la diminution de leur disque de couverture. Là où seulement quelques satellites géostationnaires suffisent à couvrir toute la surface du globe, Starlink en opère aujourd'hui près de 8 000, avec une autorisation de mise en orbite pouvant aller jusqu'à 40 000 satellites.

Un second enjeu tient à la synchronisation des satellites avec les terminaux au sol. Plus l'orbite est basse, plus la vitesse relative des satellites par rapport au sol est élevée (un satellite en orbite très basse à 450 km d'altitude se déplace à environ 27 000 km/h par rapport au sol) ; à cette altitude, un satellite reste visible depuis un point au sol pendant quelques minutes seulement. Cette contrainte très forte nécessite donc des mécanismes spécifiques pour le suivi des satellites, afin de maintenir une couverture constante à la surface du globe. Il faut également s'assurer que les *handovers*<sup>10</sup> soient calculés et effectués de manière suffisamment efficace pour permettre à chaque terminal d'avoir suffisamment de temps pour communiquer avec le réseau, en prenant en compte le temps de reconfiguration après chaque changement de connexion. Ces mécanismes de suivi et de *handovers* doivent également être compatibles avec les standards de la 5G, et donc prendre en compte tous ses éléments ; l'allocation de fréquences doit prendre en compte beaucoup plus de contraintes afin de permettre un débit et une latence satisfaisantes pour le terminal (effet Doppler, synchronisation temporelle, propagation, *timing advance*). Les solutions de *beamforming*<sup>11</sup> et les antennes doivent également être adaptées en conséquence afin de permettre le suivi des terminaux au sol.

Un troisième enjeu, et de taille, tient à l'allocation et à l'utilisation des fréquences. Cet enjeu, qui est à la fois un enjeu technique, politique et géopolitique, est primordial dans la conception d'un réseau NTN. Du fait du caractère spatial des réseaux NTN, il faut sélectionner des bandes de fréquences qui ne sont pas absorbées par l'atmosphère et qui sont relativement peu affectées par les phénomènes météorologiques. À cela, il faut ajouter la

---

<sup>9</sup> Low Earth Orbit/Very Low Earth Orbit – des orbites terrestres situées entre 200 et 450 km d'altitude pour la VLEO, et entre 450 et 2 000 km d'altitude pour la LEO.

<sup>10</sup> Événement dans un réseau de télécommunication où la connexion entre un terminal et un nœud du réseau change. Le nœud doit donc « passer » la connexion du terminal à un autre nœud pour maintenir la connexion avec le réseau.

<sup>11</sup> Le *beamforming* (formation de faisceaux) est une technique utilisée pour améliorer le rapport signal sur bruit des signaux reçus, éliminer les sources d'interférence indésirables et concentrer les signaux émis vers des emplacements spécifiques.

prise en compte des réglementations nationales sur l'usage des fréquences – certains pays restreignent l'usage de certaines bandes de fréquences sur leur territoire et les réservent à des utilisations précises, comme la télévision ou l'exploration spatiale. Le dernier volet à prendre en compte provient des recommandations de l'ITU sur l'utilisation des bandes de fréquence, qui englobent toute une variété de considérations (impact sur les réseaux terrestres, interférence générée sur les réseaux tiers, utilisation du spectre, etc.).

## LA NAISSANCE DE NOUVEAUX ÉCOSYSTÈMES - VERS UNE 6G NATIVE SPATIALE

Tous les défis listés précédemment représentent des obstacles technologiques de taille à relever afin de pouvoir concevoir des réseaux TN/NTN intégrés. Actuellement, il n'existe que quelques entreprises offrant des réseaux de télécommunications avec des satellites en orbite basse ou très basse – Starlink ou le consortium franco-britannique Eutelsat-OneWeb ne proposent pas encore massivement de services 5G NTN standardisés conformes aux spécifications 3GPP, même s'ils offrent une connectivité globale avec un service haut débit à faible latence.

De l'autre côté, la demande de connectivité augmente, avec l'ouverture de nouveaux marchés pour assurer la connectivité industrielle (sites *offshore*, industrie minière, centrales de production d'énergie), dans les transports (aéronautique – Airbus a passé un contrat avec Starlink mi-2025 pour assurer du *wifi* haut débit à bord de ses avions – ou ferroviaire) ou dans les secteurs de la défense (pour assurer une résilience du réseau) et de la réponse aux catastrophes naturelles. Les réseaux satellitaires ne sont plus vus comme des réseaux de secours, mais comme une extension native des réseaux mobiles, dont le but est d'améliorer la connectivité à la surface du globe.

En réponse à ces enjeux croissants, un nouvel écosystème a émergé au cours des dernières années, à l'intersection du spatial et des télécommunications. Il est composé de *startups* et d'instituts de recherche universitaires collaborant avec les opérateurs de réseaux de communication. Cet écosystème a pour but de concevoir des réseaux de télécommunication hybrides afin de proposer des réseaux 5G NTN ou de travailler à leur intégration à des réseaux terrestres.

De nombreuses entreprises se sont lancées dans la commercialisation d'infrastructures pour le spatial en SaaS<sup>12</sup> et commencent à commercialiser leurs solutions dans l'écosystème du NewSpace. Parallèlement, les opérateurs télécom s'intéressent de plus en plus au segment spatial et sont demandeurs de démonstrateurs techniques dans le but d'étudier la faisabilité de réseaux TN/NTN intégrés. L'enjeu principal de ces collaborations, au niveau européen, est de proposer des solutions souveraines, s'émancipant des géants américains afin de créer une indépendance stratégique dans ce secteur clé, en s'appuyant sur l'expérience d'acteurs historiques dans le domaine spatial. Ce besoin d'indépendance a déjà donné naissance au projet IRIS<sup>2</sup>, un consortium européen mené par Airbus Defense and Space et Thales Alenia Space, dont les premiers lancements devraient avoir lieu en 2027, et beaucoup d'autres initiatives émergent.

En parallèle, le 3GPP continue de travailler sur la standardisation des futures générations de réseaux de télécommunication. Les *releases* 18, parue en juin 2024 et 19, parue fin décembre 2025, cimentent encore plus le NTN comme un aspect natif des réseaux de télécommunication. Des éléments plus sophistiqués de l'intégration TN/NTN

---

<sup>12</sup> Software as a Service.

commencent à être traités, comme la possibilité d'utiliser les réseaux satellitaires à des fins de *backhauling*<sup>13</sup>, ou la possibilité d'avoir de la mobilité réseau entre TN et NTN. Les travaux de standardisation sont encore dans une phase transitoire pour préparer l'arrivée de la 6G, mais il est probable que l'intégration entre les réseaux satellitaires et terrestres soit native dans ce cadre.

Au niveau européen, ces initiatives sont chapeautées par la SNS-JU<sup>14</sup>, qui regroupe beaucoup d'acteurs des réseaux du futur et propose des financements pour ces projets innovants, ainsi que l'Agence spatiale européenne, l'ESA, et en France, nous pouvons compter sur des initiatives comme le PEPR<sup>15</sup> « Réseaux du Futur », chapeauté par le CEA, le CNRS et l'IMT et financé par France 2030. En particulier, l'Alliance France 6G a été inaugurée dans le cadre de ce PEPR en novembre 2025 pour coordonner les acteurs du milieu.

## UNIVITY - UNE ENTREPRISE FRANÇAISE DANS LA COURSE AUX RÉSEAUX 5G NTN

Contrairement aux réseaux terrestres classiques, largement dominés par quelques grands équipementiers et opérateurs historiques, l'écosystème NTN reste encore ouvert. Cette situation favorise l'émergence de nouveaux acteurs spécialisés à l'intersection des télécommunications et du spatial.

Parmi eux, Univity est une *startup* française fondée en 2022, dont l'ambition est de développer une constellation de satellites en VLEO et d'opérer un réseau NTN compatible avec les standards 5G à l'horizon 2030. L'infrastructure ainsi déployée pourrait être mise à disposition d'opérateurs télécom afin d'étendre leur couverture et de proposer une continuité de connectivité à leurs clients.

Présente à Paris et Toulouse, l'entreprise s'appuie notamment sur le soutien d'acteurs institutionnels comme le CNES, d'opérateurs télécom tels que TDF, ainsi que sur des collaborations avec plusieurs *startups* de l'écosystème NewSpace.

La conception d'un réseau 5G NTN présente de nombreux défis techniques, matériels et réglementaires auxquels les équipes sont confrontées quotidiennement. Pour y répondre, les équipes d'Univity ont conçu un ensemble d'outils pour simuler, dimensionner et choisir les briques technologiques nécessaires à la bonne réalisation du projet. Parmi ces outils, les équipes ont développé des outils de simulation orbitale, un laboratoire avec des émulateurs de canaux RF pour tester les protocoles de communication et reproduire les conditions de propagation satellitaire, un jumeau numérique pour étudier et valider le comportement des logiciels embarqués et des fonctions réseau, ou encore des modèles de validation de la plateforme satellitaire et de ses composants.

En parallèle de ses activités de développement, en juin 2025, Univity a lancé sa première charge utile à bord d'une mission Transporter de SpaceX, uniSpark<sup>16</sup>, pour démontrer sa

---

<sup>13</sup> Un réseau de *backhaul*, ou réseau d'amenée, est un réseau intermédiaire, qui permet, par exemple, l'émission et la réception de données entre un centre de radiodiffusion et une station terrestre d'un réseau de satellites ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_de\\_télécommunications](https://fr.wikipedia.org/wiki/Satellite_de_télécommunications)), ou entre les équipements de raccordement d'abonnés et le cœur des réseaux de télécommunication, fixes ou mobiles.

<sup>14</sup> Smart Network Services – Joint Undertaking.

<sup>15</sup> Programme et Équipement Prioritaire de Recherche.

<sup>16</sup> L'Institut Mines-Télécom, partenaire du programme spatial de nouvelle génération d'Univity, salué par l'Élysée : <https://www.imt.fr/imt-partenaire-du-programme-spatial-univity/>

capacité pour démontrer la faisabilité d'une liaison 5G NTN avec un satellite en orbite basse. Depuis, les premiers tests ont permis de valider plusieurs briques technologiques, et cette charge utile en orbite est le premier pas vers la mise en orbite de démonstrateurs, le programme uniShape, qui consistera en deux satellites mis en orbite pour tester les phases d'industrialisation et préparer la commercialisation du service.

# Plateformes 5G : contributions des projets PEPR réseaux du futur et CMA IMTfor5G+

Par Philippe MARTINS

Professeur au sein du laboratoire LTCI de Télécom Paris

Et Xavier LAGRANGE

Professeur à l'IMT Atlantique

Le développement et le déploiement des réseaux 5G reposent sur des plateformes d'expérimentation cruciales pour valider les innovations et garantir la reproductibilité scientifique. Ces infrastructures s'appuient largement sur des solutions logicielles libres, telles que OpenAirInterface, srsRAN, Open5GS ou Free5GC.

Le programme PEPR « Réseaux du futur », piloté par le CEA, le CNRS et l'IMT dans le cadre de France 2030, structure cette recherche nationale en mutualisant les ressources. Il s'articule autour de piliers majeurs comme RF-Net pour l'expérimentation radiofréquence, SLICES-FR pour l'expérimentation à grande échelle de la 5G, et NGC-AIoT, axé sur les réseaux cellulaires pour l'Internet des objets avec IA embarquée.

Parallèlement, le projet CMA IMTfor5G+ adapte et crée des outils pour l'enseignement. Il propose des configurations pédagogiques variées, allant de la simulation logicielle complète à l'utilisation de liaisons radio réelles en milieu protégé. Ces plateformes permettent aux étudiants et professionnels de maîtriser les protocoles 5G, la métrologie radio et les défis de l'orchestration réseau, préparant ainsi les futurs experts à répondre aux enjeux de souveraineté, de sécurité et de sobriété énergétique des infrastructures numériques.

## INTRODUCTION

Les plateformes d'expérimentation constituent un moyen privilégié de valider le développement et le déploiement à grande échelle de réseaux 5G. Elles permettent également de s'assurer de la reproductibilité des résultats de recherche, en particulier si elles s'appuient sur des solutions logicielles libres. Les plateformes peuvent se concentrer sur une partie du système 5G ou au contraire chercher à intégrer plusieurs de ses composantes. Certaines sont exploitées localement au niveau d'un site, d'autres sont au contraire multisites en vue de résoudre les problématiques de passage à l'échelle.

De nombreuses plateformes ont été développées ces dix dernières années. Certaines par des industriels, d'autres par des institutions académiques. Cet article donne une vue d'ensemble des plateformes d'expérimentation 5G au niveau national. Il se focalise dans un premier temps sur les briques de base de type logiciel libre constituant ces plateformes. Il se poursuit avec la présentation des plateformes développées dans le contexte des projets PEPR réseaux du futur (plateformes de recherche et innovation) et CMA IMTfor5G+ (plateformes d'enseignement).

## ÉCOSYSTÈME DE SOLUTIONS LIBRES POUR LA 5G

### L'émergence de la radio logicielle (SDR - Software Defined radio)

La mise à disposition sur le marché de modules radios peu onéreux (de quelques centaines d'euros) combinée à l'augmentation de la puissance de calcul disponible sur de simples ordinateurs a rendu possible le développement très large de la radio logicielle depuis les années 2010. La SDR répartit la chaîne de transmission entre un module radio, composé essentiellement de fonctions radiofréquence analogiques (convertisseurs analogique/numérique et numérique/analogique, d'un oscillateur pour la transposition en fréquence, de filtres et d'un amplificateur...) et un ordinateur chargé d'exécuter l'intégralité de la chaîne de transmission numérique.

GNU Radio [GNUR] est un logiciel libre de traitement du signal, conçu à l'origine pour la radio logicielle (SDR) et la simulation de communications sans fil. GNU Radio sert à construire des chaînes de traitement numérique du signal : réception, filtrage, synchronisation, démodulation, décodage, génération de signaux, visualisation, etc. Son principe de base est le graphe de traitement : on assemble des blocs entre eux pour former un émetteur, un récepteur ou une chaîne de simulation. Un bloc est un composant avec entrées, sorties et fonctions de traitement. GNU Radio peut s'interfacer avec un large éventail de modules radio SDR et supporte bon nombre de protocoles radio.

### Les implémentations de fonctions 5G

Parallèlement au développement de la radio logicielle, plusieurs projets *open source* ont cherché à développer des réseaux complets 4G et 5G. En 2026, plusieurs solutions de logiciels libres de réseaux 5G existent. Il convient de distinguer le réseau d'accès radio et le réseau cœur.

Concernant le réseau d'accès, deux solutions existent :

- Le logiciel OpenAirInterface [OAI] a été développé à l'initiative d'EURECOM dans une dynamique déclenchée dès les années 1990 à l'occasion de projets collaboratifs nationaux. Depuis 2014, le projet rassemble une communauté variée de contributeurs, incluant des universités, des centres de recherche et des industriels du monde entier, ce qui enrichit son développement et son adoption dans des contextes académiques et professionnels. La licence d'utilisation est de type FRAND (Fair, Reasonable And Non-Discriminatory).
- srsRAN [SRS] est une suite logicielle *open source* développée par Software Radio Systems (SRS). Le projet a débuté avec la publication de srsLTE en 2015 avant d'évoluer en 2021 vers srsRAN pour intégrer le support 5G. La licence est de type AGPLv3 (Affero General Public License version 3) mais il y a également des licences commerciales. Il est largement utilisé pour la recherche, le prototypage et les déploiements expérimentaux, offrant une implémentation flexible et interopérable des couches radio et du cœur de réseau.

Concernant le réseau cœur, les solutions sont plus nombreuses car il s'appuie sur des technologies très répandues, telles, par exemple, que le protocole HTTP :

- OpenAirInterface [OAI] propose une implémentation de réseau cœur en complément du réseau d'accès ;
- Open5GS [O5GS] est une implémentation en langage C initiée par un ingénieur logiciel coréen, Sukchan Lee, et une communauté de contributeurs ;
- Free5GC [Free5GC] est un des premiers cœurs de réseau 5G. Il a été développé en 2019 par une équipe de chercheurs de l'Université National Yang Ming Chiao Tung (NYCU) à Taïwan. Il est aujourd'hui hébergé par la Linux Foundation.

Toutes ces implémentations sont conformes aux spécifications du 3GPP. Cependant, elles peuvent différer quant aux versions (*release*) et à la panoplie de services disponibles. Le respect des spécifications permet une bonne interopérabilité et il est possible d'utiliser des terminaux du commerce avec un réseau d'accès radio d'une solution combinée avec un réseau cœur différent.

Il convient d'ajouter aux implémentations ci-dessous la solution propriétaire développée par la société française Amarisoft qui, bien que le code source ne soit pas disponible est très intéressante par sa performance et sa facilité d'utilisation. Cette solution est payante mais est largement utilisée à un niveau international.

## PLATEFORMES NATIONALES POUR LA RECHERCHE ET L'INNOVATION

### Les plateformes proposées par le PEPR « réseaux du futur »

Le programme PEPR « réseaux du futur » a été lancé dans le cadre de la stratégie d'accélération nationale de la recherche et de l'industrie France 2030. Il est piloté conjointement par le CEA, le CNRS et l'Institut Mines-Télécom. Il a pour ambition de structurer la recherche française sur les technologies 5G avancées et sur la 6G. Le programme couvre un large éventail de problématiques inhérentes au développement et à l'utilisation d'un système 5G avancé et de la 6G.

Un axe spécifiquement consacré aux plateformes est ainsi développé dans ce programme. Il vise à donner aux chercheurs des moyens mutualisés pour valider leurs concepts dans des conditions réalistes. L'objectif est de mutualiser les ressources, d'ouvrir les infrastructures à la communauté scientifique et de permettre des caractérisations et expérimentations « de bout en bout ». Par ailleurs, l'implémentation des concepts sur des plateformes nationales et parfois interconnectées à un niveau européen facilite la reproductibilité des analyses, condition essentielle du progrès scientifique. Cette stratégie constitue enfin un vecteur de souveraineté majeure pour l'ensemble de l'écosystème travaillant sur la 5G/6G. Ce projet est nommé NF-Plateforme XG dans le cadre du PEPR « réseaux du futur<sup>1</sup> ».

#### *RF-NET*

La première grande composante de plateforme du PEPR « réseaux du futur » est RF-Net, le réseau académique français de plateformes de métrologie radiofréquence<sup>2</sup>. Piloté par le CNRS, RF-Net fédère des moyens de mesure et de caractérisation dans le domaine des ondes radios et hyperfréquences. Sa vocation est d'offrir une infrastructure pour la recherche et la R&D, capable de répondre aussi bien aux besoins académiques qu'aux demandes industrielles. RF-Net propose une large offre de services, allant de la caractérisation de matériaux aux mesures sur composants, antennes, systèmes fonctionnels et canaux de propagation.

RF-Net joue un rôle essentiel car les réseaux du futur ne se résument pas à des logiciels ou à des protocoles. Ils reposent aussi sur des composants très avancés : têtes radios haute-fréquence (*front-ends* RF), réseaux d'antennes, dispositifs millimétriques et sub-THz, éléments de mesure et de calibration.

---

<sup>1</sup> <https://anr.fr/ProjetIA-22-PEFT-0011>

<sup>2</sup> <https://rf-net.fr/fr/>

## SLICES-FR

La seconde brique majeure est SLICES-FR pour Scientific Large Scale Infrastructure for Computing/Communication Experimental Studies – France<sup>3</sup>. SLICES-FR est l'infrastructure de recherche nationale française dédiée à l'expérimentation dans les domaines de la *cloud*, des réseaux du futur et des systèmes distribués [FMP25]. SLICES-FR s'articule étroitement avec les PEPR « *Cloud et Réseaux du futur* » en tant qu'infrastructure expérimentale nationale commune. Du côté du PEPR *Cloud*, son volet infrastructure SILECS structure dans SLICES-FR les dimensions *Cloud/Fog/Edge/IoT* et fournit aux projets du programme une plateforme de validation à grande échelle. Du côté du PEPR « Réseaux du futur », SLICES-FR constitue l'une des briques de l'infrastructure nationale de test, en apportant les capacités d'expérimentation de bout en bout sur les réseaux programmables. Les deux PEPR sont ainsi conçus de manière complémentaire et coordonnée autour de SLICES-FR.



Figure 1 : Écosystème SLICES-RI  
(Source : <https://slices-fr.eu/ecosysteme/>).

À l'échelle européenne, SLICES-FR s'inscrit dans l'initiative SLICES (LargeScale Infrastructure for Computing/Communication Experimental Studies), présentée comme le premier grand instrument scientifique dédié aux sciences du numérique et la première infrastructure labellisée ESFRI consacrée à la recherche en informatique [FMK22]. Cette articulation européenne donne à SLICES-FR une portée stratégique pour la souveraineté scientifique et technologique, en contribuant à bâtir une infrastructure pérenne de référence pour l'expérimentation numérique en Europe.

## NGC AIoT

NGC-AIoT est une plateforme preuve de concept consacrée aux réseaux cellulaires de nouvelle génération pour l'Internet des objets (NB-IoT/LTE-M/RedCap) et les capacités d'IA embarquées. Elle est développée conjointement par l'INRIA Saclay et Télécom Paris [NGC-AIoT]. NGC-AIoT a bénéficié de l'expérience et l'expertise acquises au cours des nombreuses années d'exploitation de la plateforme nationale FIT IoTLab [FIT] pour les cas d'usage purement IoT et de la plateforme industrielle NB-IoT/IA embarquée développée dans le cadre du projet BPI 5GmMTC [5GmMTC]. Cette dernière orientation est importante car elle vise non seulement les réseaux télécoms généralistes, mais également les usages où la connectivité, le calcul en périphérie et l'intelligence embarquée doivent fonctionner ensemble. NGC-AIoT met donc à disposition un ensemble de ressources matérielles et logicielles permettant de développer les cas d'usage associant connectivité IoT et traitement des données à l'accès, dans des situations où les futurs réseaux devront être à la fois performants, programmables, économes en énergie et capables de s'adapter à des objets et services hétérogènes.

<sup>3</sup> <https://slices-fr.eu/>



Figure 2 : Plateforme NGC-AIoT (Source : Projets NGC AIoT et BPI 5GmMTC).

NGC-AIoT Home Docs

Running experiments (2)

ID	User	Elapsed	State	Ending	Nodes
ID-1747759672-6FGGJX	mrmc	12 days, 6 hours (10h)	Running	2025-06-03 14:08	(1 node) node:110
ID-1748684675-VHD7ON	ca4jh	1 day, 13 hours (15h)	Running	2025-06-10 09:45	(1 node) node:105

Architectures

Nodes

24 nodes (17 available, 3 busy, 4 dead)

ID	Name	State	Archi	Site	Sensors
100	j10-1	Alive	Jetson-Nano	Saclay	
101	j10-2	Alive	Jetson-Nano	Saclay	
102	j10-3	Dead	Jetson-Nano	Saclay	
103	j10-4	Alive	Jetson-Nano	Saclay	
104	j10-5	Alive	Jetson-Nano	Saclay	
105	j20-1	Busy	Jetson-Xavier-NX	Saclay	
106	j20-2	Alive	Jetson-Xavier-NX	Saclay	
107	j20-3	Dead	Jetson-Xavier-NX	Saclay	
108	j20-4	Alive	Jetson-Xavier-NX	Saclay	
109	j20-5	Dead	Jetson-Xavier-NX	Saclay	
110	j40-1	Busy	Jetson-Orin-NX	Saclay	
111	j40-2	Dead	Jetson-Orin-NX	Saclay	
112	rp14-1	Alive	Raspberry-pi	Saclay	
113	rp14-2	Alive	Raspberry-pi	Saclay	
114	rp14-3	Alive	Raspberry-pi	Saclay	
115	rp14-4	Alive	Raspberry-pi	Saclay	
116	rp14-5	Alive	Raspberry-pi	Saclay	
117	jtx2-1	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
118	jtx2-2	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
119	jtx2-3	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
120	jtx2-4	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
121	jtx2-5	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
122	jtx2-6	Alive	Jetson-TX2-NX	Saclay	
124	jagx32-1	Dead	Jetson-AGX-32	Saclay	

Figure 3 : Plateforme NGC-AIoT (Source : Projet NGC AIoT).

## PLATEFORMES NATIONALES POUR L'ENSEIGNEMENT : PROJET CMA IMTfor5G+

### Description et objectifs du projet IMTfor5G+

IMTfor5G+ est un projet porté par l'Institut Mines-Télécom et soutenu par l'État dans le cadre de l'AMI Compétences et Métiers d'Avenir du programme France 2030 opéré par la Caisse des Dépôts. Il vise à renforcer et renouveler l'offre de formation, initiale comme continue, autour de la 5G et des réseaux télécoms du futur, en réponse aux besoins croissants des entreprises et aux enjeux de souveraineté numérique, de sécurité, de sobriété énergétique et d'évolution des infrastructures numériques.

Le projet s'adresse à un public large : étudiants en école d'ingénieurs ou en master, doctorants, professionnels en activité, ainsi que techniciens de niveau bac+2/3. Son ambition est de proposer des formats variés de montée en compétences, tels que des masters spécialisés, formations initiales et continues, parcours en ligne et modules certifiants, afin de diffuser les savoirs sur la 5G et ses évolutions sur l'ensemble du territoire.

IMTfor5G+ repose sur une approche associant recherche, expérimentation et pédagogie appliquée. Le projet mobilise plusieurs écoles du réseau IMT ainsi que des partenaires académiques et industriels majeurs, afin de former des profils capables de concevoir, déployer et piloter les infrastructures et services numériques de demain, tout en intégrant les dimensions environnementales, industrielles et sociétales du numérique.

Le projet a mené une étude approfondie sur l'adaptation de plateformes existantes aux besoins de l'enseignement. Il a déterminé les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre sur les codes informatiques existants ou à développer de nouveaux pour couvrir l'ensemble des besoins pédagogiques inhérents à l'enseignement de la 5G.

### Plateformes développées dans le cadre du projet

#### *Plateforme d'analyse protocolaires 5G*

L'une des premières difficultés rencontrées dans l'enseignement de la 5G est l'apprentissage des protocoles mis en œuvre par cette technologie. Ces protocoles sont variés car un réseau mobile fédère des technologies de transmission hétérogènes (liaisons radio, liaisons d'accès, transport haut débit) et ils traitent différents niveaux de détails selon le principe du modèle en couches. La maîtrise d'un système doit combiner une compréhension fine de chaque interface et une vision globale de l'interaction des différents protocoles.

Les plateformes sont donc construites soit avec un sous-ensemble, soit avec la totalité des entités fonctionnelles d'un réseau 5G. De plus, elles sont équipées de sondes matérielles ou logicielles permettant de capturer les échanges entre ces entités fonctionnelles. Des modules d'affichage en temps différé ou en temps réel permettent une mise en forme pédagogique des échanges capturés.

Plusieurs variantes d'utilisation sont possibles suivant le degré de virtualisation et l'intégration ou non de transmissions radio réelles.

#### Plateforme réseau avec liaison radio réelle

Cette plateforme est composée d'un ou plusieurs PC avec une implémentation logicielle du réseau d'accès 5G. Elle intègre des modules radio de type USRP [USRP]



Figure 4 : Plateforme avec liaison radio réelle  
(Crédit photo : Philippe Martins).

permettant de disposer d'une liaison radio réelle et d'intégrer éventuellement des terminaux 5G du commerce.

### Plateforme réseau avec liaison radio sur câble

La plateforme précédente nécessite de pouvoir transmettre en milieu protégé (cage de Faraday) ou de disposer d'une bande de fréquence attribuée par l'ARCEP (par exemple dans le cadre d'un réseau privé 5G). Lorsque cela n'est pas possible, il demeure possible d'utiliser les mêmes composants matériels et logiciels que la plateforme avec liaison radio réelle mais la transmission se fait *via* un câble de transmission (qui supporte le signal HF). Cette configuration permet d'éviter l'utilisation d'une cage de Faraday ou d'une fréquence licenciée.



Figure 5 : Plateforme avec liaison radio sur câble (Crédit photo : Philippe Martins).

### Plateforme réseau avec liaison radio bande de base

L'utilisation de têtes radio (USRP) peut s'avérer un obstacle en raison de leur coût élevé. Lorsque le matériel disponible se limite à des ordinateurs, il est possible de mettre en œuvre une plateforme composée uniquement de PC. La plateforme intègre alors l'ensemble des piles protocolaires sur la voie radio. La quasi-totalité de la couche physique est implémentée : seule la transposition en fréquence est exclue. Le signal transporté est donc un signal bande de base. Ce type de plateforme est en général limité à l'intégration de quelques terminaux (UE) du fait de limitations en puissance de calcul. Très souvent, il n'y a qu'un seul terminal.

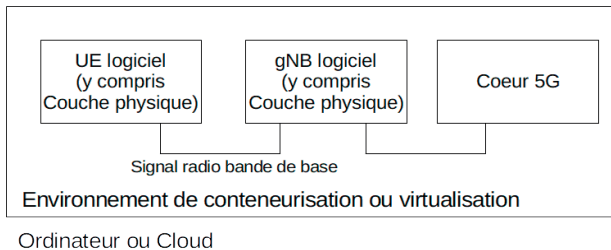


Figure 6 : Plateforme virtualisée avec chaîne radio sans transposition en fréquence (Source : Auteurs dans le cadre du projet CMA IMTfor5G+).

Les solutions *open source* [OAI] et [SRS] permettent ce type de configuration *via* l'utilisation d'un bus logiciel (interface ZMQ) servant à transporter le signal de bande de base entre un téléphone logiciel et une station de base 5G. Il est également envisageable d'émuler le canal radio en mettant en œuvre des modèles canaux simples au niveau du bus logiciel. Lorsque les besoins en performance sont plus conséquents, il est nécessaire d'avoir recours à des solutions propriétaires de type Amarisoft [Amarisoft], permettant de simuler des centaines de terminaux sur une même machine, en s'appuyant également sur un bus logiciel propriétaire (interface TRX).

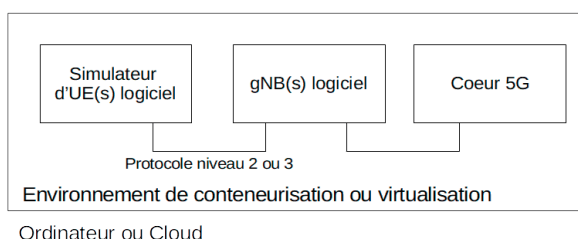
### Plateforme réseau partiellement ou totalement virtualisé

Lorsqu'il n'est pas nécessaire d'étudier l'ensemble des couches protocolaires de l'interface radio, il est possible de simplifier l'interface radio en remplaçant les couches RLC, MAC et physique par une simple transmission (par exemple un transport UDP/IP). Ce type de

plateforme intègre cependant l'ensemble de la signalisation radio de niveau 3 (protocole RRC) et notamment la gestion des connexions.

Dans ce cas, la plateforme est typiquement virtualisée dans sa totalité. L'intérêt est qu'il est possible de simuler un nombre de terminaux plus important (typiquement plusieurs dizaines). Un simulateur d'UE possible est [UERANSIM].

Figure 7 : Plateforme virtualisée sans couche physique radio (Source : Auteurs dans le cadre du projet CMA IMTfor5G+).



La plateforme d'analyse de traces protocolaires 5G développée dans le projet s'appuie sur des outils logiciels développés spécifiquement. Elle nécessite également de faire l'acquisition de têtes radio permettant de faire fonctionner les UE en environnement protégé et extérieur.

En cas d'utilisation de vraies transmissions radio, le fonctionnement doit se faire en environnement protégé (cage de Faraday).

Dans les autres cas, il est possible de virtualiser tout ou partie du réseau (UE et éléments de réseaux).

### Plateforme de métrologie radio et réseau

L'utilisation de terminaux de test (*drive test*) est un vecteur intéressant pour faire comprendre le fonctionnement d'un réseau dans un réseau opérationnel, que ce soit un réseau d'opérateur grand public ou un réseau de test. Il permet notamment de mettre en évidence la différence entre les modèles théoriques (*e.g.* cellules hexagonales) et le terrain (irrégularité et fluctuation de la notion de cellule).

La plateforme développée est constituée de terminaux de trace et de logiciels de visualisation. Pour transformer un terminal standard en outil de trace, il est nécessaire de faire l'acquisition de logiciels spécialisés [TEMS], [Xcal], [QXDM] et, bien sûr, de disposer de cartes SIM permettant l'accès au réseau analysé.

L'avantage des solutions propriétaires est qu'elles permettent de disposer d'une grande variété de mesures et de rapatrier les échanges de signalisation sur la voie radio.

Des solutions gratuites existent, mais elles se limitent à quelques mesures radio avec une périodicité et une précision limitée et ne permettent en général pas de faire de l'analyse protocolaire.

Pour permettre une analyse approfondie des mesures, celles-ci sont couplées par un logiciel développé dans le cadre du projet IMTfor5G+ avec une base de données des sites radios. Pour la France, le service *web* [Cartoradio] est disponible à cet effet.

La fonction de la plateforme de métrologie est de fusionner les localisations des sites données par Cartoradio et les mesures radios qui sont géolocalisées puis d'effectuer un traitement afin de les rendre facilement affichables sur un navigateur *web*, comme indiqué à la Figure 8.

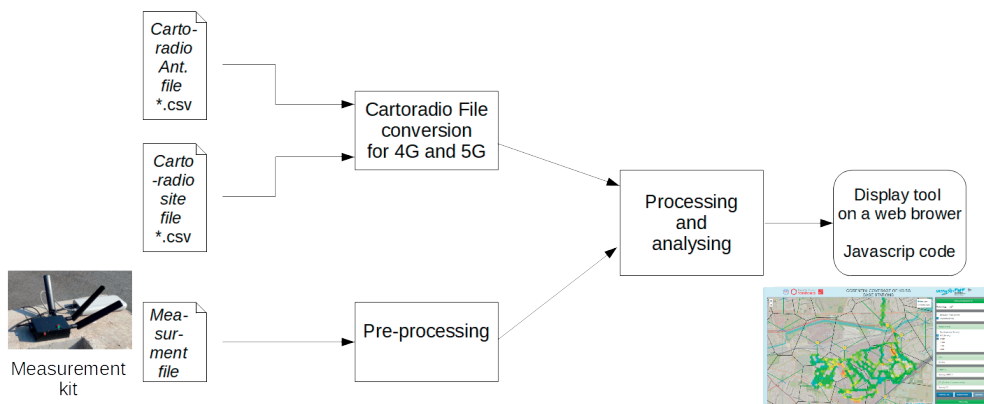


Figure 8 : Principe de traitement des mesures radio (Source : Auteurs dans le cadre du projet CMA IMTfor5G+).

L'utilisation d'outils de métrologie nécessite de confier aux étudiants les terminaux de trace de façon à ce qu'ils puissent effectuer eux-mêmes leur campagne de mesure. Le traitement des mesures peut se faire sur n'importe quel type d'ordinateur. C'est dans ce contexte que ce projet IMTfor5G+ a également développé sa propre solution de *drive test* en logiciel libre. Il s'agit du projet Tramex [Tramex]. Il permet de se connecter à un téléphone logiciel ou à une station de base 5G Amarisoft. L'ensemble des procédures du réseau d'accès 5G peut ainsi être affiché dans plusieurs écrans graphiques à vocation pédagogique. Chaque écran illustrant un des points de fonctionnement du système.

### *Plateforme de déploiement et d'orchestration de réseau et de verticaux 5G*

Le projet inclut également une plateforme dont l'objectif est de mettre en œuvre des services utilisant un ou plusieurs réseaux 5G, ces derniers apparaissant comme des boîtes noires.

Cette plateforme s'appuie à la fois sur des outils logiciels libres (OpenAirInterface, SRSRAN, Open5GS), sur des matériels (*clusters* de calculs CPU/GPU, têtes radio, commutateurs pilotables par logiciel, accélérateurs matériels) et sur des solutions propriétaires (Amarisoft). Elle est mise en œuvre dans plusieurs sites de l'IMT en fonction des domaines d'application envisagés. La plateforme Mandjet Telecom, déployée à Rennes, sur le site de l'IMT Atlantique, est un réseau 5G privé utilisé comme support pédagogique pour former les étudiants à la couverture radio, à la configuration du réseau cellulaire, à l'architecture réseau et aux aspects réglementaires. Elle s'intéresse à l'usage des énergies renouvelables dans les réseaux 5G (solaire).

Les plateformes IT<sup>m</sup> Factory et DIWII, situées sur le site de Mines Saint-Étienne, sont des plateformes mobilisées pour l'enseignement de l'intégration de la 5G dans l'industrie du futur. L'usage de la 5G en environnement de production et la conception de formations appliquées à l'industrie 4.0 est particulièrement mis en avant. La plateforme IMT SDR Lab, située sur le site de Palaiseau, dans les locaux de Télécom Paris, est une plateforme intégrant l'ensemble des composants d'un système 5G/6G. Elle comprend un réseau d'expérimentation en milieu protégé (Cage de Faraday), un *datacenter* hébergeant les fonctions réseaux virtualisées, une salle d'expérimentation pour les verticaux IoT/IA embarquée et un réseau privé 4G/5G opéré en bande B38/N38.

Tableau 1 : Plateformes développées dans le cadre du projet PEPR réseaux du futur.

Plateforme	Établissement / réseau	Usage
RF-Net	Réseau national coordonné par le CNRS, avec des laboratoires partenaires comme IETR, XLIM, IEMN, IMS et Lab-STICC	Caractérisation matérielle pour les réseaux du futur : matériaux, composants et circuits, antennes et rayonnement, systèmes fonctionnels, canaux de propagation.
SLICES-FR	Infrastructure nationale portée par Inria, s'appuyant sur des précurseurs comme Grid'5000, IoT-LAB et CorteXlab	Expérimentation réseau à grande échelle sur les protocoles, technologies radio, services, <i>cloud/edge</i> , systèmes distribués et IoT.
NGC-AIoT	Plateforme bi-localisée Inria-Saclay / Télécom Paris	Expérimentation sur les réseaux cellulaires de nouvelle génération pour l'IoT et les capacités d'IA embarquées.

Tableau 2 : plateformes IMT dans le cadre du projet IMTfor5G+.

Plateforme	École	Usage pédagogique
Mandjet Telecom	IMT Atlantique	Réseau 5G privé expérimental sur le campus de Rennes, utilisé comme support pédagogique pour former les étudiants à la couverture radio, à la configuration du réseau cellulaire, à l'architecture réseau, à la gestion des cartes SIM et aux aspects réglementaires.
IT'm Factory	Mines Saint-Étienne	Plateforme mobilisée pour l'enseignement de l'intégration de la 5G dans l'industrie du futur, avec des cas d'usage concrets, des maquettes industrielles et des modules de formation destinés aux étudiants comme aux professionnels.
DIWII	Mines Saint-Étienne	Plateforme pédagogique centrée sur les expérimentations industrielles, l'usage de la 5G en environnement de production et la conception de formations appliquées à l'industrie 4.0.
Plateforme d'analyse protocolaire et réseaux privés 5G	IMT/Telecom Paris IMT Atlantique (site de Rennes)	Plateforme d'enseignement, de recherche comprenant : <ul style="list-style-type: none"> <li>- infrastructure <i>indoor</i> en milieu protégé (cage de Faraday)</li> <li>- infrastructure <i>indoor</i> et <i>outdoor</i> en bande B38/N38 (4G/5G) pour enseignement.</li> </ul> Construction d'un réseau complet à partir de solutions open source (OAI, SRSRAN) Plateforme avec liaison sur câble.

## CONCLUSION

Grâce à des investissements européens et nationaux massifs, en particulier, *via* le plan de relance France 2030, nous disposons de plateformes permettant d'expérimenter de nouveaux usages sur des réseaux 5G et la mise en œuvre de nouvelles briques technologiques en vue de la 6G. À travers les projets Compétences et métiers d'avenir (CMA), et notamment IMTFor5G+, il est désormais possible de fournir des outils pédagogiques favorisant l'assimilation et la maîtrise de ces technologies qui sont par nature complexes. Ces efforts contribuent à permettre de conserver une souveraineté sur le long terme de ces technologies clés dans la société de l'information et de la connaissance.

## RÉFÉRENCES

- [FMP25] Solenne Fortun, Nathalie Mitton, Christian Pérez. Experiment. Innovate. Transform. The future of digital infrastructure starts with SLICES. Innovation Platform, 2025, 24, pp. 16-24, <https://hal.science/hal-05409390v1>
- [FMK22] Serge Fdida, Nikos Makris, Thanasis Korakis, Raffaele Bruno, Andrea Passarella, *et al.* SLICES, a scientific instrument for the networking community. Computer Communications, 2022, 193, pp. 189-203, <https://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2022.07.019> ; <https://hal.science/hal-03941155v1>
- [OAI] Réseau cœur, réseau d'accès radio, station de base et terminal 5G, <https://openairinterface.org/>
- [O5GS] Réseau cœur, <https://open5gs.org/>
- [TEMS] In-depth network testing and troubleshooting (Infovista), <https://www.infovista.com/products/tems-investigation/network-testing-and-troubleshooting>
- [Xcal] Products (Accuver), <https://www.accuver.com/products/network-optimization/XCAL>
- [QXDM] QXDM Professional™ Tool Quick Start (Qualcomm), [https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/80-n9471-1-d\\_qxdm\\_professional\\_tool\\_quick\\_start.pdf](https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/80-n9471-1-d_qxdm_professional_tool_quick_start.pdf)
- [SRS] Station de base et terminal 5G, <https://www.srslte.com/5g>
- [Cartoradio] Carte des sites et des mesures radioélectriques développée par l'ANFR, [www.cartoradio.fr](http://www.cartoradio.fr)
- [GNUR] Module de transmission radios, <https://www.gnuradio.org/>
- [UERANSIM] UERANSIM, <https://github.com/aligungr/UERANSIM>
- [Amarisoft] <https://www.amarisoft.com/>
- [Free5G] Free5G, Open Source Core Network Implementation, <https://free5gc.org/>
- [NGCAIoT] NGC AIoT testbed presentation, <https://smart-networks.europa.eu/wp-content/uploads/2025/11/ngcaiot-presentation-sns-presentation-philippe-martins.pdf>
- [FIT] Slices RI, <https://www.iot-lab.info/>
- [5GmMTC] Plateforme 5G-mMTC, <https://5g-mmtdc.fr/>
- [USRP] Ettus research, <https://www.ettus.com>
- [TRAMEX] IMT/TP, <https://github.com/tramex>

# Orange, l'opérateur des réseaux privés 5G

Par Charles-Henri MORIN

Directeur adjoint des Réseaux et Services mobiles  
à la direction technique des Réseaux d'Orange France

Et Nicolas CARRERE-DEBAT

Responsable de la Création technique des offres mobiles chez Orange

Engagé dès la conception de cette technologie de réseau mobile innovante, Orange investit depuis plus de 5 ans dans l'implémentation de la 5G afin de construire des solutions permettant aux différents secteurs de l'industrie d'accélérer leur transformation numérique grâce à une connectivité adaptable à volonté. Qu'il s'agisse des transports, de la santé ou encore de l'événementiel, nous montrons en quoi cette nouvelle connectivité opérée et adossée à des infrastructures nationales comme locales répond aux enjeux des réseaux privés.

## UN RÔLE DE *LEADER*

Lorsqu'une nouvelle génération de technologie des réseaux mobiles se développe, Orange fait partie des quelques acteurs dans le monde des télécoms qui interviennent dans toutes les grandes phases de son cycle de vie : de sa conception initiale pour en penser les fondations techniques jusqu'à sa déclinaison opérationnelle dans les infrastructures et les offres pour tous les segments de marché, en passant par sa standardisation avec l'ensemble de l'industrie.

Orange joue ainsi un rôle de premier plan depuis les premiers jours de la 5G et a été présent à tous ses grands rendez-vous :

- Parce que la 5G, c'était d'abord la promesse d'un réseau plus puissant à l'accès grâce aux toutes nouvelles capacités des antennes Massive MIMO, d'abord implémentées dans la bande C de l'IMT avec leur "beamforming", Orange France a acquis dès 2020 la licence pour exploiter la plus grande part du spectre (90 MHz) alors mis aux enchères par le régulateur.
- Depuis lors, Orange s'est affirmé comme l'opérateur déployant le plus largement ce spectre sur le territoire français, atteignant 79 % de la population française couverte en *outdoor* avec la fréquence 3,5 GHz à début mars 2026 grâce à plus de 13 000 sites équipés avec cette technologie.
- Investissant ensuite sur les nouvelles solutions de cœur de réseau 5G, *cloud native*, Orange a mis en œuvre dès juin 2023, en France, la technologie de *slicing* appliquée aux réseaux privés 5G opérés, en démontrant la capacité à partager la même infrastructure de réseau d'accès entre les services « opérateurs » classiques accessibles au grand public et les services « privés » uniquement accessibles à une entreprise sur sa zone de couverture.
- En octobre 2024, Orange a commercialisé les premières offres dites 5G+ s'appuyant sur l'évolution "Standalone" de la 5G, permettant de s'affranchir totalement de la tech-

nologie historique 4G pour accéder directement en 5G au réseau, améliorant ainsi la latence et la sécurité.

- En mars 2025, Orange était le premier acteur du marché français à proposer une offre grand public mettant en œuvre la *slicing* pour apporter une connectivité premium dans les circonstances où le réseau est le plus sollicité.

C'est donc en *leader* qu'Orange mène ce cycle de création de nouvelles solutions et de nouvelles offres, cycle qui continue à mesure que les possibilités de la 5G s'élargissent. L'infrastructure qui la sous-tend, qu'il s'agisse de l'accès ou du cœur de réseau, est désormais déployée chez Orange France à une échelle industrielle, performante et dont la sécurité est maîtrisée, ce qui permet la mise en œuvre rapide de nouvelles solutions.

## LA 5G, UN *ENABLER* TECHNIQUE MULTIFACETTE

Ces nouvelles solutions sont tournées vers les clients d'Orange, sur tous les marchés et tous les segments.

Or, une caractéristique singulière de la 5G, c'est de permettre la convergence de l'ensemble des usages *wireless* sous une même bannière technologique : téléphonie grand public, téléphonie d'entreprise, internet mobile, applications spécialisées peuvent être regroupées sur un même socle commun tout en bénéficiant des traitements différenciés dont elles ont besoin pour bien fonctionner : maîtrise de la latence, routage particulier, limitation des pertes de paquet...

Cette capacité protéiforme de la technologie s'applique à tous les secteurs : industriel, transports, santé, portuaires, *smart cities*, utilitaires, évènementiels...

Les réseaux privés hybrides ou comment la technologie 5GSA permet de dépasser l'antagonisme entre infrastructures privées et partagées.

Pour chacun de ces secteurs, la connectivité est un ingrédient essentiel de sa transformation numérique. Cette connectivité doit être à la fois largement disponible dans le temps et dans l'espace, très réactive et garantir la souveraineté des données qu'elle transporte. Toutes ces dimensions doivent pouvoir varier afin de s'adapter aux exigences métiers spécifiques de chacun. Il faut ainsi pouvoir proposer toutes les caractéristiques d'un réseau privé, conçu pour le fonctionnement particulier des métiers du secteur tout en tirant le meilleur de l'infrastructure du réseau opérateur qui apporte une couverture large et résiliente.

Cet antagonisme entre infrastructure privée et réseau partagé, Orange le résout grâce à ses solutions de réseau hybride. Les réseaux privés hybrides offrent une flexibilité déterminante permettant la mise en œuvre de classes de service différenciées en fonction de la nature et la criticité des usages, la création de points d'échappement du trafic vers le réseau local de l'entreprise, ainsi que la combinaison sécurisée des usages locaux et Internet. À l'intérieur des sites industriels, la profondeur de la couverture réseau peut être ajustée en fonction des besoins métiers tout en étant complétée par la couverture opérateur en extérieur.

Pour bien articuler la combinaison entre privé et partagé, le trafic client de l'entreprise pour ses usages métiers spécifiques – typiquement, hors trafic internet classique – est porté par des équipements dédiés déployés dans l'enceinte de l'entreprise. Ces équipements interagissent avec le reste de l'infrastructure opérateur en utilisant les interfaces

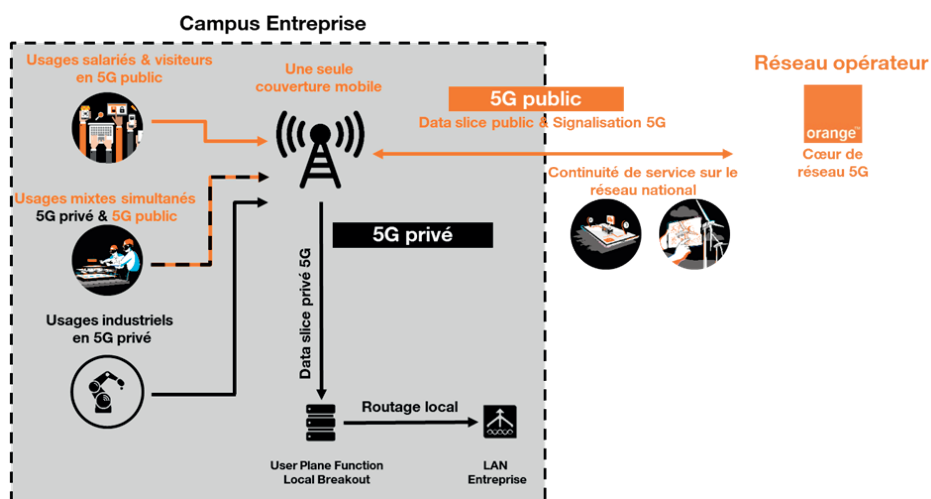


Figure 1 : Schéma de principe de la solution Mobile Private Network hybrid (Source : Orange).

standard de la norme 5G. Ces équipements, comme le reste du réseau, restent exploités par Orange, ce qui apporte deux avantages majeurs :

- le réseau privé hybride de l'entreprise bénéficie des améliorations continuellement apportées par Orange sur l'ensemble de son réseau : optimisations quotidiennes, évolutions fonctionnelles des logiciels, maintien en conditions de sécurité ;
- symétriquement, cela gomme pour l'entreprise la complexité opérationnelle liée à l'exploitation, la maintenance et la sécurité d'un réseau privé, ce qui constitue un enjeu majeur pour les entreprises ne disposant pas des compétences techniques internes nécessaires.

## CAS DU SECTEUR DES TRANSPORTS

Le secteur des transports illustre de manière typique le besoin de couverture étendue et diversifiée, alternant des environnements extérieurs et intérieurs, avec la nécessité d'une continuité parfaite pour des cas d'usages tels que le *Push-to-Talk* critique ou la traçabilité des véhicules, camions, trains ou navires, *via* des solutions IoT (*Internet of Things*). Le réseau doit s'adapter aux exigences des métiers en délivrant une connectivité sécurisée de bout en bout dont les caractéristiques restent parfaitement constantes tout au long des axes de transports, même lorsqu'ils traversent des lieux à forte densité d'utilisateurs tels que les gares ou les aéroports. Dans ces contextes de forte densité d'utilisateurs, des mécanismes de garantie de bande passante et de priorisation du trafic sont mis en œuvre pour garantir la continuité du service.

Les ports, en particulier *via* les infrastructures de type *Smart Hub*, constituent un enjeu spécifique en raison de la diversité des acteurs qui y interviennent : automatisation des grues, véhicules autonomes, vidéosurveillance, suivi des marchandises, assistance à l'accostage des navires, etc. Ces zones, à la fois en intérieures et en extérieures, doivent répondre simultanément aux exigences de plusieurs métiers appartenant à des organisations et des entreprises différentes.

Là aussi, la technologie 5G est d'un apport déterminant : grâce aux mécanismes de *slicing*, elle permet à ces entreprises multiples d'utiliser une infrastructure partagée comme

autant de réseaux privés. Orange met en œuvre le *slicing* dans ses solutions réseaux privés hybrides, associé à des partenaires exploitant des services en *edge computing* directement connectés au réseau opérateur, afin de garantir une performance optimale dans ces environnements complexes.

## HÔPITAUX ET UNIVERSITÉS : DES CAMPUS DE NATURES DIFFÉRENTES MAIS AVEC DES BESOINS COMMUNS

Les hôpitaux et les universités partagent une caractéristique commune : il s'agit de lieux où doivent pouvoir coexister les usages des professionnels travaillant dans l'établissement et les usages du public potentiellement nombreux le visitant, et ceci à travers les différents bâtiments. Ces établissements sont généralement équipés d'infrastructures *wifi* parfois obsolètes et souvent insuffisamment sécurisées, nécessitant une modernisation afin de répondre aux exigences croissantes en matière de connectivité et de sécurité. Un réseau 5G privé hybride répond à ces enjeux de couverture étendue, de sécurité renforcée et de capacité à discriminer les usages pour supporter de nouveaux services et applications critiques.

## L'ÉVÉNEMENTIEL

S'il y a bien un secteur où la maîtrise de la connectivité est un défi difficile à relever, c'est celui de l'évènementiel : concentration importante d'utilisateurs, profil de trafic très atypique comme l'envoi simultané de vidéos au moment phare de l'évènement, surconsommation pendant les pauses ou les mi-temps, couverture non adaptée dans les festivals, ce sont autant de situations qui impactent les usages des professionnels des médias. Les solutions de réseaux privés virtuels et de garantie de service pour un usage ciblé prennent tout leur sens dans ce contexte : diffusion de flux média dans les coulisses, garantie de transactions bancaires pour les paiements, solution *Push-to-Talk* ou suivi vidéo pour les équipes de sécurité. Orange expérimente ces services lors de grands événements et continue de développer ses offres afin de répondre de manière optimale aux exigences du secteur évènementiel.

## PERSPECTIVES

La technologie 5G pose des fondations durables et unificatrices pour la connectivité *wireless* :

- Massive MIMO et *beamforming* au niveau accès radio ;
- fonctions containerisées dans le cœur de réseau, tout en conservant leur architecture *statefull*, qui les différencient du monde *web*, et avec un niveau d'exigence très fort sur la disponibilité, l'intégrité et la confidentialité des traitements réalisés ;
- la capacité à *slicer* le réseau, c'est-à-dire à gérer des contextes dans lesquels les traitements sont différenciés à chaque nœud du réseau.

Ce socle a déjà permis de répondre aux besoins de nos clients à travers des solutions innovantes et sécurisées, applicables à de nombreux secteurs de l'industrie. Il est pérenne car il servira sans doute de base aux futures évolutions du réseau mobile.

En tant que contributeur de ces fondations technologiques et acteur industriel de leur mise en œuvre à grande échelle, Orange joue plus que jamais le rôle d'opérateur de confiance qui accompagne ses clients dans l'appropriation de ces technologies au service de leur transformation numérique.

# Le Réseau Radio du Futur (RRF) : la 5G au service des missions de sécurité et de secours

Par Guillaume LAMBERT

Ancien directeur de l'Agence des communications mobiles opérationnelles  
de sécurité et de secours (ACMOSS)

Entre ambition opérationnelle et exigence souveraine, le déploiement du Réseau Radio du Futur (RRF)<sup>1</sup> engage bien plus qu'une modernisation technologique : il redéfinit l'horizon des communications critiques pour les décennies à venir.

Quand les pompiers pénètrent dans un bâtiment en flammes, quand les unités de police judiciaire coordonnent une interpellation, quand le Samu déclenche un plan blanc – chaque seconde compte, et chaque échange radio peut déterminer une issue vitale. Ces communications, aujourd'hui assurées au travers de réseaux radio bas débit, déployés dans les années 1990, sont en train d'être entièrement refondées en tirant le meilleur parti des réseaux mobiles de cinquième génération (5G). Le RRF n'est pas une simple mise à jour des moyens de radiocommunication : c'est une révolution dans la manière dont l'État communique en situation de crise.

## DES RÉSEAUX HÉRITÉS AUX LIMITES DE LEURS CAPACITÉS

La France s'appuie depuis plus de vingt ans sur l'Infrastructure Nationale Partageable des Transmissions (INPT) qui sert de support aux différents réseaux radio bas débit dédiés aux forces de sécurité et de secours : ACROPOL pour la police nationale et les préfetures, ANTARES pour les services de secours et la sécurité civile, CORAIL NG pour la gendarmerie nationale. Ces réseaux reposent sur la norme TETRAPOL (*Terrestrial Trunked Radio POLice*).

À ces infrastructures s'ajoutent des réseaux TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*), standard européen harmonisé, utilisés par de nombreuses polices municipales.

Si ces technologies ont prouvé leur robustesse (haute disponibilité, chiffrement de bout en bout, fonctionnement en mode direct terminal-à-terminal sans infrastructure), elles butent désormais sur des limitations structurelles difficilement surmontables par simple évolution logicielle, ainsi que sur des contraintes spectrales et capacitaires devenues rédhibitoires.

La bande de fréquence allouée pour ces réseaux – principalement autour de 380–400 MHz – offre une couverture géographique excellente mais une capacité en bande passante

---

<sup>1</sup> Lancement du projet Réseau Radio du Futur (RRF), le réseau très haut-débit souverain des services de sécurité et de secours (ministère de l'Intérieur), <https://www.interieur.gouv.fr/archives/actualites/communiqués-de-pressé/lancement-du-projet-reseau-radio-du-futur-rrf-reseau-tres-haut>

intrinsèquement limitée. Concrètement, un canal TETRAPOL classique ne transporte que 7,2 kbit/s de données utiles. Dans les années 1990, transmettre de la voix compressée était une performance ; en 2026, c'est une contrainte opérationnelle majeure.

Les scénarios contemporains exigent bien davantage : retransmission de flux vidéo HD depuis les caméras embarquées des drones de reconnaissance, partage en temps réel de la géolocalisation des équipes engagées, consultation de bases de données biométriques sur le terrain, coordination multi-agences *via* des applications collaboratives. Ces usages sont tout simplement incompatibles avec les capacités actuelles des réseaux PMR (*Private Mobile Radio*) classiques.

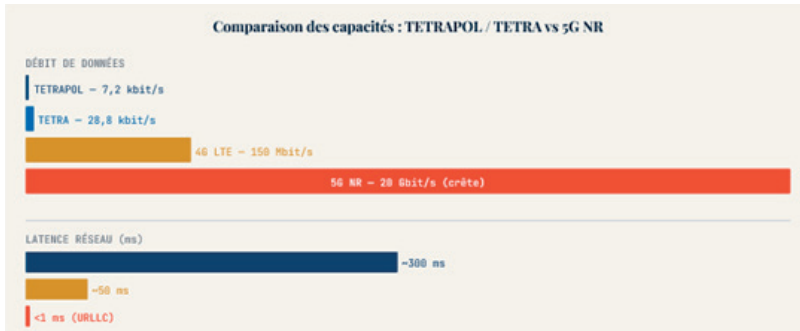


Figure 1 : Représentation comparative du débit de données (haut) et de la latence réseau (bas) des principales technologies de radiocommunication : l'écart entre les normes PMR classiques et la RG NR dépasse plusieurs ordres de grandeur sur ces deux dimensions critiques (Source : ACMOSS).

À ces limitations capacitaires s'ajoute la problématique de l'obsolescence matérielle. Les composants électroniques embarqués dans les terminaux TETRAPOL ne sont plus produits en série, renchérissant la maintenance. Les éditeurs de logiciels de supervision (centres de commandement, consoles d'exploitation) migrent vers de nouveaux paradigmes d'architecture que les passerelles vers les anciens réseaux supportent de plus en plus mal.

La question n'est donc plus de savoir s'il faut migrer, mais comment le faire sans rupture de service sur des infrastructures dont la disponibilité doit être garantie 24h/24, 365 jours par an.

## L'ARCHITECTURE DU RRF : UNE 5G TAILLÉE POUR LES USAGES CRITIQUES

Le Réseau Radio du Futur ne se résume pas à un simple changement de standard de transmission. Il s'agit d'une refonte architecturale complète, depuis la couche physique radioélectrique jusqu'aux applications métier, en passant par une infrastructure de cœur de réseau entièrement virtualisée.

Le réseau radio du futur est un réseau hybride, qui utilise principalement la 4G, puis la 5G, mais disposant également de capacités en radio sur la bande de fréquence 700 MHz. Cette architecture hybride n'est pas un compromis : c'est un choix stratégique délibéré qui garantit une couverture maximale dès le lancement tout en préparant la montée en puissance vers les capacités 5G au fil du déploiement.

## Le modèle MVNO<sup>2</sup> souverain avec priorité de préemption

La singularité architecturale la plus remarquable du RRF réside dans son modèle d'accès au réseau. Le RRF n'est pas un réseau isolé : c'est un réseau de réseaux. Son cœur de réseau, opéré par l'ACMOSS<sup>3</sup>, s'appuie sur les antennes 4G et 5G de Bouygues Telecom et d'Orange, avec des mécanismes de qualité de service, de priorité et de préemption. En cas de saturation du réseau, les abonnés du RRF bénéficient d'un accès priorisé à la couverture réseau 4G/5G pour répondre à leurs missions de protection de la population. En cas d'indisponibilité de ces deux opérateurs, un abonné au RRF peut aussi accéder en itinérance nationale aux réseaux de SFR et de Free.

## Les services MCX : bien plus que du “push-to-talk”

Le standard MCX (Mission Critical Communications over LTE/5G<sup>4</sup>), défini par le 3GPP, constitue l'épine dorsale applicative du RRF. Il se décline en trois composantes : MCPTT (voix “push-to-talk”), MCDATA (données) et MCVideo (vidéo). Le cœur de réseau dual-mode 4G/5G du RRF alimente cette transformation, offrant des mécanismes de priorité, de présélection et de qualité de service spécialement adaptés aux missions critiques.

Conçu conformément aux standards *3GPP Mission-Critical Services*, le RRF garantit compatibilité, durabilité et ouverture technologique.

Cette conformité aux standards internationaux est une décision stratégique majeure : elle protège l'État contre le risque de dépendance à un écosystème propriétaire fermé, et prépare l'interopérabilité européenne.

## La résilience : le mode direct et les dispositifs déployables

L'une des innovations majeures du déploiement est la mise à disposition de passerelles radio de transition permettant d'interfacer le RRF avec les anciens réseaux bas débit encore en service.

Le Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS) de l'Oise a ainsi installé une passerelle radio de transition bas débit 4 voies mise à disposition par l'ACMOSS, permettant l'interfaçage du RRF avec ANTARES et VHF. Ces passerelles garantissent la continuité opérationnelle pendant la période de migration.

Pour les situations de rupture d'infrastructure, la résilience du système est renforcée par des dispositifs mobiles de couverture en cours de déploiement : des stations de base déployables<sup>5</sup> capables de rétablir une couverture 4G sur une large zone en 72 heures, des solutions de réponse rapide, plus légères et opérationnelles en moins de six heures, ainsi que des relais véhiculaires<sup>6</sup>, installés de façon permanente dans les véhicules d'intervention, qui fournissent une couverture radio locale et une connexion terrestre ou satellitaire avec le cœur du RRF.

<sup>2</sup> Opérateur de réseau mobile virtuel (Wikipédia), [https://fr.wikipedia.org/wiki/Op%C3%A9rateur\\_de\\_r%C3%A9seau\\_mobile\\_virtuel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Op%C3%A9rateur_de_r%C3%A9seau_mobile_virtuel)

<sup>3</sup> <https://www.acmoss.fr/>

<sup>4</sup> 5G Critical Communications & Application Enablement for Verticals (3GPP), <https://www.3gpp.org/technologies/sa6-cc-apps>

<sup>5</sup> Les stations de base déployables (SBD) : une réponse pérenne pour la continuité des communications critiques avec le Réseau Radio du Futur (ACMOSS), <https://www.acmoss.fr/les-stations-base-deployables>

<sup>6</sup> Le Relais véhiculaire du Réseau Radio du Futur à l'épreuve du terrain (ACMOSS), <https://www.acmoss.fr/actualites/le-relais-vehiculaire-du-reseau-radio-du-futur-a-l-epreuve-du-terrain>

## DE LA 4G À LA 5G NR : LE RÔLE DES MÉCANISMES DE QUALITÉ DE SERVICE, PRIORITÉ ET PRÉEMPTION

Le RRF est aujourd'hui déployé sur une architecture 4G LTE dont les composants de cœur de réseau sont dimensionnés pour accueillir, à l'horizon 2027-2028, les fonctions natives de la 5G NR (*New Radio*). Cette trajectoire n'est pas un compromis technique par défaut : c'est une stratégie délibérée qui permet de garantir la disponibilité immédiate du service sur l'ensemble du territoire, tout en posant dès à présent les fondations des mécanismes avancés que la 5G NR rendra automatiques et beaucoup plus fins. Pour comprendre l'enjeu, il faut d'abord saisir précisément ce que recouvrent trois mécanismes techniques fondamentaux : la QCI, l'ACB et l'ARP.

### L'architecture 5G NSA : une 5G ancrée dans le cœur 4G

En mode 5G Non-Standalone (NSA), les stations de base 5G NR ne constituent pas un réseau autonome : elles s'appuient sur le cœur de réseau 4G EPC (*Evolved Packet Core*) existant pour l'ensemble des fonctions de contrôle – authentification, gestion de la mobilité, établissement de session.

Ce choix architectural, pragmatique à court terme, présente deux avantages majeurs pour le RRF : il capitalise sur l'infrastructure EPC déjà déployée et opérationnellement éprouvée par Orange et Bouygues Telecom, et il permet d'activer des débits radio 5G NR (bande 3,5 GHz) là où la densité d'utilisateurs le justifie, sans attendre un déploiement complet du cœur 5G Standalone (5GC).

Le RRF tire ainsi un bénéfice immédiat en capacité et en débit, tout en faisant reposer la logique de qualité de service sur les mécanismes LTE déjà maîtrisés.

Les mécanismes de qualité de service, de priorité et préemption (QPP) sont l'une des innovations majeures du RRF. Lors d'un événement de grande ampleur – match de football, attentat, catastrophe naturelle – les réseaux commerciaux se saturent immédiatement sous l'afflux des communications citoyennes. Les communications sont garanties par une priorité d'accès au réseau, en cas de congestion.

En clair, le réseau « pousse de côté » les communications civiles pour préserver la bande passante des forces de sécurité. C'est la traduction technique du principe de continuité de l'État en situation de crise. Les mécanismes de QPP paramétrés au sein du RRF reposent sur trois procédures (QCI, ACB et ARP).

#### *La QCI : classer les flux pour garantir les priorités*

La QCI (*QoS Class Identifier*) est le mécanisme central de différenciation des flux dans les réseaux LTE. Chaque porteur radio ("*bearer*") se voit attribuer un identifiant QCI – une valeur numérique de 1 à 9 (standardisée 3GPP) ou au-delà pour les QCI opérateurs – qui détermine les paramètres de traitement du flux dans le réseau : priorité de planification ("*scheduling priority*"), délai maximal de transfert ("*packet delay budget*"), taux de perte maximal toléré ("*packet error loss rate*"), et type de débit garanti (GBR : *Guaranteed Bit Rate*) ou non garanti (Non-GBR).

Dans le contexte du RRF, la QCI permet de distinguer concrètement les différentes natures de trafic opérationnel. Un appel MCPTT (voix critique) utilisera une QCI de type GBR à très haute priorité et délai minimal, similaire à la QCI 1 définie pour la VoLTE conversationnelle temps réel. La transmission d'un flux vidéo MCVideo HD depuis un drone sera acheminée sur une QCI GBR à priorité élevée mais avec un budget de délai légèrement assoupli – la vidéo tolère davantage de latence qu'une voix interactive. Les flux MCDATA (transfert de fichiers, géolocalisation, accès aux bases de données) seront

traités *via* des porteurs Non-GBR dont la priorité reste élevée mais sans garantie de débit absolu, ce qui convient à des échanges de données asynchrones. Enfin, les applications de gestion courante ou les mises à jour logicielles seront reléguées aux QCI les moins prioritaires, garantissant qu'elles ne consomment jamais de ressources radio au détriment des flux opérationnels critiques.

### *L'ACB : bloquer le superflu pour protéger l'essentiel*

Le mécanisme d'ACB (Access Class Barring) intervient à un niveau différent : non plus dans le traitement des flux, mais dans l'accès même au réseau. Dans les réseaux LTE, les terminaux mobiles sont classés en Access Classes (AC) 0 à 15. Les classes 0 à 9 sont attribuées aléatoirement à la population générale des abonnés ; les classes 10 à 15 sont réservées à des catégories d'utilisateurs spéciaux – dont, précisément, les services d'urgence (classes 12 et 14) et les agents gouvernementaux (classe 13).

Lorsqu'un réseau est en situation de surcharge – typiquement lors d'un attentat, d'une catastrophe naturelle ou d'un grand rassemblement public – l'eNB (station de base LTE) peut diffuser des paramètres ACB qui interdisent temporairement aux classes 0 à 9 de tenter des accès, réduisant ainsi massivement les tentatives de connexion et préservant les ressources radio pour les classes prioritaires.

Les terminaux du RRF, appartenant aux classes 12, 13 et 14, sont immunisés contre ces barrages : ils peuvent toujours accéder au réseau, même lorsque les communications civiles sont totalement bloquées.

### *L'ARP : la préemption comme ultime garantie*

L'ARP (*Allocation and Retention Priority*) opère à un troisième niveau, complémentaire des deux précédents. Là où la QCI différencie la nature du flux et l'ACB régule l'accès au réseau, l'ARP détermine ce qui se passe lorsque les ressources radio sont épuisées malgré les filtres précédents : quel porteur radio doit être préempté – c'est-à-dire interrompu de force – pour libérer de la capacité au profit d'un porteur plus prioritaire ?

Chaque porteur se voit attribuer une valeur ARP composée de trois paramètres : un niveau de priorité (de 1 à 15, où 1 est le plus prioritaire), un indicateur de « préemptabilité » (ce porteur peut-il être interrompu par un porteur plus prioritaire ?) et un indicateur de capacité à préempter d'autres porteurs. Un appel de détresse MCPTT d'un sapeur-pompier engagé dans un incendie se verra attribuer un ARP de niveau 1, non préemptable, et capable de préempter tous les autres porteurs actifs. Un flux vidéo drone aura un ARP de niveau 2 ou 3 – prioritaire mais préemptable si le réseau devient critique. Les communications « standards » auront des ARP de niveaux 11 à 15, préemptables en toutes circonstances.

La combinaison « QCI + ARP » constitue ainsi un système de gestion à deux couches : la QCI garantit la qualité de service en régime nominal, l'ARP garantit la survie des flux critiques en régime de congestion extrême. Pour le RRF, c'est cette combinaison qui traduit techniquement l'engagement de l'ACMOSS : les communications de sécurité et de secours sont garanties même quand les réseaux d'Orange et de Bouygues sont saturés par les communications « grand public ».

Les effets des trois types de procédures techniques peuvent être résumés dans la Figure 2, située page suivante, qui met en évidence les plus-values opérationnelles du RRF et de l'utilisation du MCX SYRIUS qui sécurisent « l'expérience utilisateur ».

## Qualité d'Expérience Utilisateurs pour les utilisateurs RRF

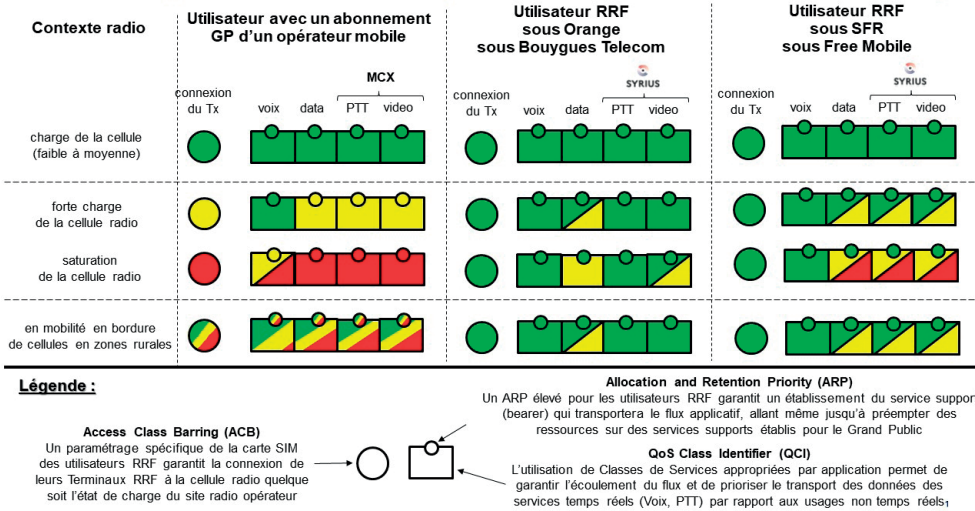


Figure 2 : Qualité d'expérience utilisateurs pour les utilisateurs RRF (Source : ACMOSS).

## Vers la 5G SA : l'automatisation native de la QoS critique

Le passage à une architecture 5G Standalone (SA) – avec un cœur de réseau 5GC natif – représente l'étape suivante dans la trajectoire du RRF. La 5G NR SA ne se contente pas d'améliorer les mécanismes existants : elle les réinvente en profondeur selon trois axes majeurs.

Premièrement, la QCI est remplacée par le 5QI (5G QoS Indicator), qui reprend la même logique de classification mais avec une granularité beaucoup plus fine et surtout une intégration native avec le "network slicing". Dans une architecture Standalone, chaque tranche réseau (*slice*) bénéficie d'une isolation physique des ressources radio et de transport : les flux MCPTT n'empruntent plus simplement une voie prioritaire sur un réseau partagé, ils circulent dans un conduit dédié dont les ressources ne peuvent en aucun cas être consommées par d'autres usages, qu'ils soient prioritaires ou non. C'est une différence de nature, et non de degré. Un réseau de transmission vidéo drone, un canal de voix tactique et un flux de données cartographiques peuvent coexister sur la même infrastructure physique tout en bénéficiant d'une isolation complète et de garanties de qualité de service indépendantes.

Deuxièmement, l'ACB est remplacé par l'UAC (*Unified Access Control*), un mécanisme beaucoup plus expressif qui permet de contrôler l'accès au réseau de manière différenciée par service, par catégorie d'abonné et par type de trafic, de façon simultanée et programmable depuis le cœur de réseau, sans reconfiguration manuelle des stations de base. En situation de crise, l'opérateur peut bloquer instantanément des catégories d'accès très précises sur l'ensemble du territoire, ou sur une zone géographique définie, en quelques secondes sur instruction du centre de supervision du RRF.

Troisièmement, la latence ultra-faible du mode URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*) – inférieure à 1 milliseconde en conditions optimales – ouvre des

cas d'usage inaccessibles en LTE : pilotage à distance de robots de neutralisation avec retour haptique, synchronisation tactique en temps réel entre commandants d'opérations distants, ou systèmes d'alerte précoce avec analyse embarquée sur le terminal.

**FOCUS TECHNIQUE – DE LA 4G NSA À LA 5G SA : CONTINUITÉ ET RUPTURE**

**Ce qui est conservé :** les identifiants de qualité de service (QCI → 5QI), la logique d'allocation et de rétention (ARP), les classes d'accès prioritaires pour les services d'urgence, et les mécanismes de préemption. Les investissements conceptuels et opérationnels consentis aujourd'hui sur l'architecture 4G/NSA ne seront pas perdus lors du passage au SA.

**Ce qui change radicalement :** l'isolation physique via le network slicing (là où la 4G applique des règles de priorité sur un réseau partagé, la 5G SA alloue des ressources dédiées et inviolables), la programmabilité du cœur de réseau via des interfaces SDN/NFV ouvertes, et la capacité à orchestrer dynamiquement les ressources en fonction de la situation opérationnelle en cours, sans intervention humaine dans la chaîne de décision.

**Pour le RRF :** la migration vers le 5G est planifiée dans le COP 2026-2030 de l'ACMOSS. L'architecture dual-mode actuelle (EPC + composants 5G NSA) a précisément été conçue pour minimiser la rupture lors de cette transition.

Figure 3 : Focus technique de la 4G NSA à la RG SA : continuité et rupture (Source : ACMOSS).

La 5G SA ne fera pas que renforcer les garanties actuellement apportées au RRF par les mécanismes de QPP : elle les automatisera davantage, en éliminant les rares points de friction subsistants dans l'architecture NSA actuelle, et elle ajoutera la couche de l'isolation physique par le “*network slicing*”, qui transformera des engagements contractuels en garanties architecturales inviolables. C'est en ce sens que l'on peut dire que l'architecture 4G NSA du RRF n'est pas une étape de transition contrainte, mais un tremplin délibérément conçu vers la pleine puissance de la 5G NR.

## DES USAGES OPÉRATIONNELS TRANSFORMÉS EN PROFONDEUR POUR LES FORCES DE SÉCURITÉ ET DE SECOURS

Le RRF ne remplace pas une radio par une autre radio. Il opère une mutation fondamentale dans la manière dont les services de sécurité et de secours traitent l'information : passer de la transmission de la voix à la gestion intégrée de la donnée opérationnelle en temps réel.

Au-delà des communications vocales, le RRF ouvre la voie à de nouveaux usages opérationnels. Il permet notamment le partage de flux vidéo en temps réel, l'échange instantané de données, la transmission d'informations médicales, l'intégration d'images issues de drones ou encore la gestion d'objets connectés à grande échelle. Ces fonctionnalités renforcent la coordination des équipes engagées et contribuent à une prise de décision plus rapide et mieux informée lors des interventions.

## SYRIUS Mobile et SYRIUS Dispatcher : l'architecture à deux faces d'une même révolution

L'application MCX SYRIUS<sup>7</sup>, déployée sur les terminaux durcis du RRF, constitue la pièce maîtresse de l'expérience utilisateur. Elle se décline en deux modes complémentaires qui forment ensemble un système de communication opérationnelle intégré, jamais atteint avec les anciens réseaux PMR.

SYRIUS Mobile est l'interface embarquée sur les terminaux terrain des agents opérationnels. Sur un seul écran sécurisé, l'agent dispose d'une vue cartographique en temps réel affichant sa position et celle de l'ensemble des équipiers engagés sur le même incident – qu'ils appartiennent au même service ou à un service partenaire. Les communications vocales MCPTT ("*push-to-talk*") s'y lancent d'une simple pression, avec constitution automatique de groupes de conversation dynamiques regroupant instantanément tous les acteurs concernés par une intervention – sapeurs-pompiers, policiers et médecins du Samu réunis dans un même canal, sans manipulation fastidieuse de fréquences ou de plans de numérotation. Les flux vidéo sont accessibles depuis la même interface, avec un chiffrement de bout en bout transparent pour l'utilisateur. L'envoi d'images, de documents opérationnels, de rapports photographiques ou de données médicales (électrocardiogrammes, constantes vitales) se fait par glisser-déposer, exactement comme sur un *smartphone* grand public – à la différence que chaque octet est chiffré et que chaque transmission bénéficie de la garantie QPP du réseau.

SYRIUS Dispatcher est la face commandement de la même application, déployée sur les postes de travail des salles opérationnelles des SDIS, salles d'opération des préfectures, centres de régulation médicale du Samu, centres opérationnels des polices municipales, etc.

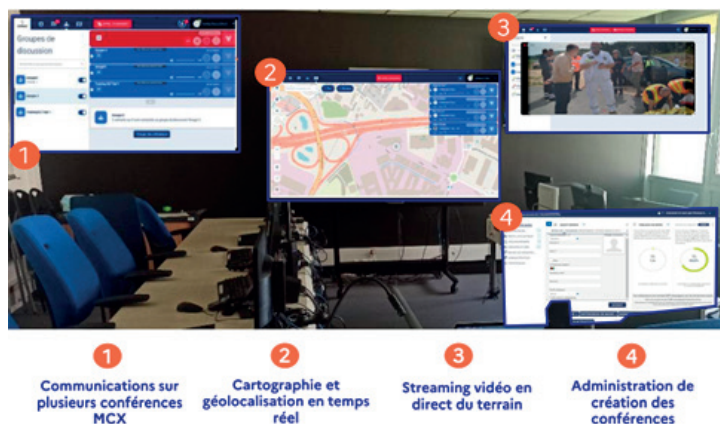


Figure 4 : L'application SYRIUS Dispatcher pour salle de commandement (Source : ACMOSS).

Les opérateurs y reçoivent en temps réel la totalité des flux remontants depuis le terrain : positions GPS de chaque intervenant, conversations de groupe actives, flux vidéo, données de terrain. Ils peuvent prendre la parole dans n'importe quel groupe, ouvrir un canal bilatéral avec un agent spécifique, déclencher une alerte de détresse, ou rediriger un flux

<sup>7</sup> L'application SYRIUS et ses principales fonctionnalités (ACMOSS), <https://www.acmoss.fr/syrius>

vidéo vers un expert distant – un médecin au CHU visualisant en direct l'état d'une victime coincée dans un véhicule, un démineur guidant à distance une équipe face à un colis suspect. L'architecture interservices de SYRIUS Dispatcher est particulièrement structurante : pour la première fois, un officier de permanence préfectoral peut superviser sur un tableau de bord unique les communications de l'ensemble du continuum de sécurité et de secours, sans jongler entre plusieurs systèmes hétérogènes.

C'est la traduction technologique du concept de commandement interservices unifié, longtemps désiré mais techniquement impossible avec les anciens réseaux silotés.

## **Le terminal RRF : un bureau numérique mobile opérationnel**

L'une des transformations les plus profondes – et les moins visibles depuis l'extérieur – introduites par le RRF est la mutation du terminal radio en bureau numérique mobile opérationnel. Un agent équipé d'un terminal RRF ne dispose plus seulement d'un moyen de communication : il dispose d'un poste de travail complet, sécurisé, connecté en permanence aux systèmes d'information de son organisation.

Concrètement, depuis son terminal RRF un sapeur-pompier peut consulter les plans d'un bâtiment, accéder à la fiche de données de sécurité d'un produit chimique stocké dans un entrepôt en feu, ou signaler une victime dans le système de suivi des victimes (SSV) partagé avec le Samu.

Cette convergence entre communications opérationnelles et systèmes d'information métiers représente une rupture doctrinale majeure. Elle introduit la messagerie professionnelle sécurisée comme canal de travail à part entière sur le terrain : les ordres d'opérations, les comptes rendus de situation, les photographies, les formulaires réglementaires – tout peut désormais circuler *via* des messageries dédiées chiffrées, traçables et archivées conformément aux exigences procédurales. Le RRF n'est pas une alternative aux outils de bureau : il les étend jusqu'au dernier mètre de l'intervention, là où la décision se prend et où l'information naît.

## **L'IoT opérationnel massif : la 5G SA comme catalyseur d'un écosystème capteur inédit**

Au-delà des communications entre agents, le RRF ouvre une perspective radicalement nouvelle pour les services de sécurité et de secours : la connexion massive de capteurs et objets connectés dédiés aux opérations. La capacité mMTC (*massive Machine Type Communications*) de la 5G SA – jusqu'à un million de terminaux par kilomètre carré – rend envisageable des scénarios d'instrumentation du terrain jusqu'alors impossibles à opérer sur des réseaux radio PMR à bande étroite.

Pour les opérations de secours à personne ou d'aide médicale urgente, l'IoT 5G SA transforme la prise en charge pré-hospitalière : les brancards connectés transmettent en temps réel le *monitoring* complet du patient (pression artérielle, ECG, saturation, glycémie) depuis l'ambulance vers le médecin régulateur du Samu et le service des urgences du centre hospitalier de destination, permettant de préparer la salle de déchocage avant l'arrivée du véhicule. Les tensiomètres, défibrillateurs semi-automatiques et moniteurs multiparamétriques des équipes de premiers secours deviennent des nœuds d'un réseau médical mobile, dont toutes les données sont archivées dans le dossier de régulation médicale en temps réel.

## L'intelligence artificielle embarquée et au bord du réseau : vers l'agent augmenté

L'architecture 5G du RRF ouvre deux modalités complémentaires d'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les opérations : l'IA au bord du réseau (*edge AI*), déportée sur des serveurs de calcul localisés au plus près des stations de base, et l'IA embarquée (*on-device AI*), exécutée directement sur le processeur du terminal RRF, sans aucun échange réseau. Ces deux modalités se complètent et s'activent selon la disponibilité du réseau et la sensibilité des données traitées.

### CONCLUSION

Depuis le 19 juin 2025 et la mise en exploitation du RRF, la France est entrée dans une nouvelle ère des communications critiques opérationnelles. Le déploiement du RRF représente bien davantage qu'une modernisation technique : c'est un choix stratégique permettant d'affirmer la maîtrise d'une technologie fondamentale au bon accomplissement des missions de sécurité et de secours. En passant d'une infrastructure de voix à une plateforme de traitement de l'information opérationnelle en temps réel, la France se dote des moyens d'élever substantiellement le niveau de protection de sa population.

La singularité du modèle français mérite d'être soulignée. Le choix d'un cœur de réseau souverain hébergé dans les *data centres* du ministère de l'Intérieur, combiné à un accès multi-opérateurs avec mécanismes de qualité de service, de priorité et de préemption, offre un équilibre rare entre performance, résilience et maîtrise souveraine. C'est ce modèle que l'ACMOSS présente dans les instances européennes comme une contribution potentielle à la construction de l'EUCCS<sup>8</sup> (*European Critical Communication System*).

Les défis qui restent devant nous – montée en puissance vers les 300 000 abonnés, déploiement des capacités 5G avancées, intégration de l'IA, préparation de l'interopérabilité européenne – sont considérables. Mais la trajectoire est tracée, les jalons techniques sont validés, et les premiers retours des services engagés sur le terrain sont encourageants. La question n'est plus de savoir si le RRF sera à la hauteur de ses ambitions. Elle est de savoir à quelle vitesse les organisations utilisatrices s'approprieront ses capacités pour les transformer en avantages opérationnels réels, au service des citoyens qu'elles ont pour mission de protéger.

---

<sup>8</sup> Towards the EU Critical Communication System (EUCCS) (Commission européenne), <https://ec.europa.eu/newsroom/cipr/items/829339/>

# Le haut débit mobile critique dans les Aéroports de Paris

Par François MUNEROT

Directeur adjoint de la Business Line Mobile Pro chez Hub One

En 2020, les aéroports parisiens ont opéré une transformation majeure de leurs infrastructures de télécommunications en passant des réseaux mobiles privés historiques à une architecture haut débit mobile critique fondée sur les standards 3GPP. Longtemps concentrés sur la voix et des technologies à bande étroite (TETRA, PMR), les systèmes de communication doivent désormais répondre à des usages massifs de données, à la digitalisation des opérations et aux exigences du Smart Airport. La convergence entre télécoms et systèmes d'information, l'abandon progressif du *wifi* comme solution de contournement, puis l'adoption de la 4G/5G permettent une continuité de service, une mobilité totale et une fiabilité critique.

Déployé sur l'ensemble des plateformes aéroportuaires, ce réseau hybride mutualisé supporte aujourd'hui plus de 30 000 terminaux et garantit des performances élevées dans des environnements complexes et contraints. Cette évolution ouvre la voie à de nouveaux usages industriels, logistiques et IoT, tout en renforçant la sécurité et la résilience opérationnelle des infrastructures aéroportuaires.

## LE BESOIN EN COMMUNICATIONS DANS UN AÉROPORT

Dans toute activité de production, la synchronisation efficace et fiable des informations entre individus est essentielle pour le bon déroulé des opérations. Les aéroports de Paris rassemblent plus de 120 000 employés en période de pointe, répartis sur plus d'un millier d'entreprises. Environ 30 métiers différents interviennent autour d'un avion pour gérer son arrivée et permettre son redécollage en toute sécurité, dans les meilleurs délais.

Ces *process* sont orchestrés directement sur le terrain par les équipes, avec l'appui des machines, souvent dans des conditions difficiles (contraintes météorologiques, bruit ambiant). Le facteur temps y est déterminant, dans un contexte de sûreté et de sécurité permanent. Du commandant de bord au personnel technique au sol, du bagage enregistré en soute jusqu'à sa restitution au passager, chaque étape doit intervenir au bon moment, au bon endroit, et en toute sécurité.

## Un usage universel : les réseaux « PMR »

L'ensemble de ces métiers utilisent depuis de nombreuses années des réseaux mobiles privés historiquement appelés « PMR » (Private Mobile Radio). L'usage du *talkie-walkie* demeure universel et quasiment irremplaçable : il constitue un outil de travail indispensable pour les opérationnels.

Ces systèmes permettent de contacter instantanément les personnes concernées par un événement, *via* des échanges verbaux courts, souvent codifiés, sans numérotation préalable. Les communications peuvent s'adresser à un seul individu ou à un groupe pouvant

aller jusqu'à plusieurs centaines de personnes en une fraction de seconde, ce qui constitue l'une de leurs caractéristiques essentielles. L'appel de groupe est ainsi une fonctionnalité native des réseaux privés, quelle que soit la technologie utilisée.

Au-delà de l'aspect technique, ces communications conservent une dimension humaine forte : la voix transmet des nuances, une intention, une urgence. Cela favorise la confiance entre les équipes, la synchronisation des actions, les prises de décisions et l'efficacité opérationnelle. Les équipements radio doivent donc être robustes et spécifiquement conçus pour garantir une qualité audio optimale, quel que soit l'environnement.

À ces fondamentaux s'ajoutent des fonctionnalités complémentaires telles que la gestion de flotte, la priorisation des appels ou les communications d'urgence. Des données numériques peuvent également être transmises en parallèle : états, télécommandes ou jalons opérationnels.

### **De la voix à la donnée, vers les nouveaux usages**

Historiquement centrés sur la voix, les réseaux mobiles privés proposent également des services de données. Toutefois, ces derniers reposent sur des technologies à bande étroite, aux débits limités et aux capacités de commutation restreintes.

Dans ce contexte, ils ne permettent pas de répondre aux nouveaux usages nécessitant des débits élevés et une intégration avec les systèmes d'information classiques. Une rupture s'est ainsi installée entre les réseaux privés traditionnels et le monde informatique.

Or, les métiers expriment aujourd'hui un besoin croissant de connectivité, avec les mêmes exigences d'immédiateté, de mobilité et de fiabilité afin de gagner en efficacité. Cela concerne notamment la remontée d'informations sur les passagers et leurs bagages, mais aussi les équipements industriels associés (chariots, tapis, données avioniques, informations commerciales de vol, etc.).

Plus au large des aéroports, l'environnement aéroportuaire devient de plus en plus instrumenté. Les pistes sont équipées de capteurs permettant de suivre leur état et d'optimiser leur maintenance en effectuant des prévisions. Les véhicules sont géolocalisés et sécurisés par des systèmes d'anticollision, y compris en conditions de faible visibilité. Des dispositifs d'urgence intègrent désormais des flux vidéo prioritaires.

Dans ce contexte, les capacités offertes par les réseaux privés traditionnels ne sont plus suffisantes pour accompagner l'essor du *big data* et du concept de Smart Airport.

### **La fiabilité est une exigence fondamentale**

Qu'il s'agisse de voix ou de données, les communications professionnelles doivent être fiables en toutes circonstances. Il s'agit de réseaux conçus pour fonctionner même en situation dégradée ou de crise.

L'épisode neigeux de 2011 en région parisienne en est une illustration : alors que les réseaux de communication publics atteignaient la saturation, le réseau TETRA de l'aéroport a continué de fonctionner sans aucune dégradation. Ce type de réseau n'est pas nécessairement supérieur en performance brute, mais il est parfaitement adapté à son usage.

Cette exigence est aujourd'hui désignée sous les termes de Mission Critical et Business Critical, selon deux cibles différentes mais sensibles.

## QUEL VIRAGE TECHNOLOGIQUE PRENDRE DANS UN MONDE CONNECTÉ ?

### Obsolescence des technologies à bande étroite

Les Aéroports de Paris ont historiquement déployé des réseaux privés dédiés à leurs plateformes. Le TETRA (Terrestrial Trunked Radio), dernière technologie en date, offrait des services voix performants ainsi que des capacités limitées en données.

Dans les années 2010, cette technologie a commencé à montrer des signes d'obsolescence. Une question stratégique s'est alors posée : fallait-il prolonger une technologie mature mais en fin de vie, ou investir dans une nouvelle génération de réseaux ?

Face à l'essor rapide des technologies 3G, 4G et 5G, les solutions à bande étroite apparaissaient peu évolutives. Les réseaux grand public bénéficiaient d'investissements massifs permettant des avancées technologiques majeures (MIMO, modulation avancée, agrégation de porteuses), difficilement accessibles aux réseaux privés traditionnels, moins développés dans le monde.

Le besoin de convergence était évident : les usages professionnels nécessitaient désormais des performances comparables à celles des réseaux publics.

### Vers un haut débit mobile critique

Pour répondre aux besoins en données, les Aéroports de Paris ont initialement déployé des réseaux *wifi* professionnels en complément du TETRA. Ceux-ci offraient un accès IP standard permettant de connecter aisément les systèmes d'information des entreprises.

Cependant, le *wifi* présente des limites dans les environnements industriels. Issu du monde de l'informatique (normes IEEE) et conçu comme une extension du réseau local (LAN), il est adapté à la mobilité limitée dite nomade, mais non aux déplacements rapides et fréquents. La gestion des changements de cellule repose essentiellement sur le terminal, contrairement aux réseaux dits mobiles (normes 3GPP) où l'infrastructure assure la continuité de service, même à grande vitesse (jusqu'à 500 km/h en 5G).

Ainsi, malgré ses performances reconnues, le *wifi* ne répond pas pleinement aux exigences de fiabilité des usages critiques.

Avec la 4G, une évolution majeure apparaît : une architecture entièrement IP, permettant une intégration fluide avec les systèmes d'information. Cette convergence entre télécommunications et informatique constitue une rupture fondamentale.

Par ailleurs, les réseaux mobiles utilisent des fréquences attribuées et régulées, garantissant une meilleure maîtrise de la disponibilité et des performances qu'avec les bandes libres utilisées par le *wifi*.

La Figure 1, située page suivante, positionne graphiquement les technologies en question en fonction des débits offerts et de la performance en mobilité, permettant ainsi d'illustrer la réflexion.

### Convergence vers le 3GPP

En Europe, les réseaux critiques reposaient historiquement sur des standards définis par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Très tôt, cet organisme a identifié le LTE ("Long Term Evolution") comme la technologie la plus prometteuse à long terme, à condition de l'adapter aux exigences professionnelles.

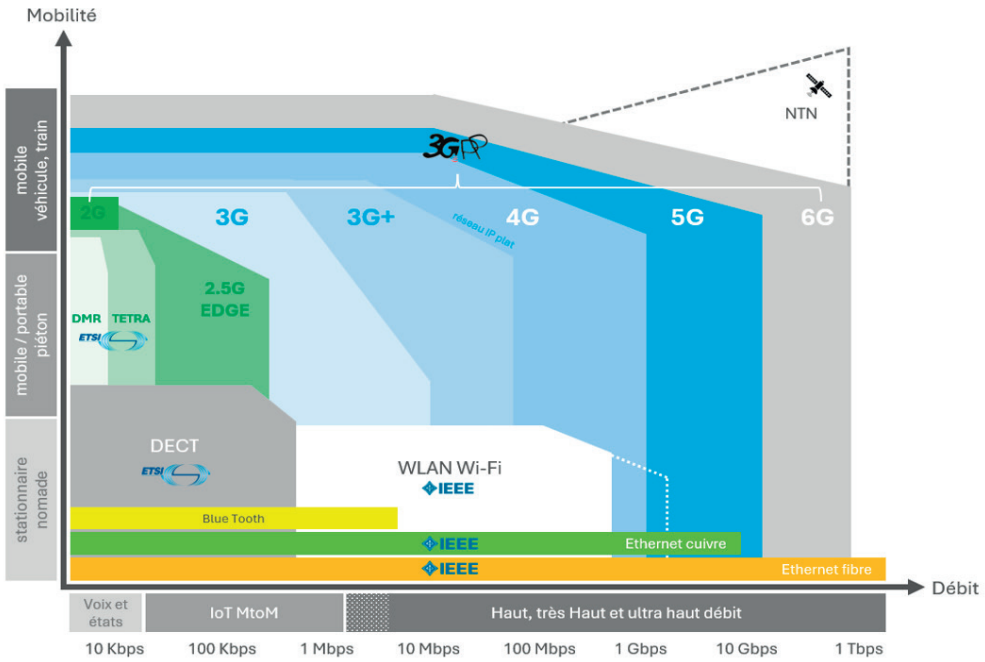


Figure 1 : Paysage technologique télécom (Source : Hub One).

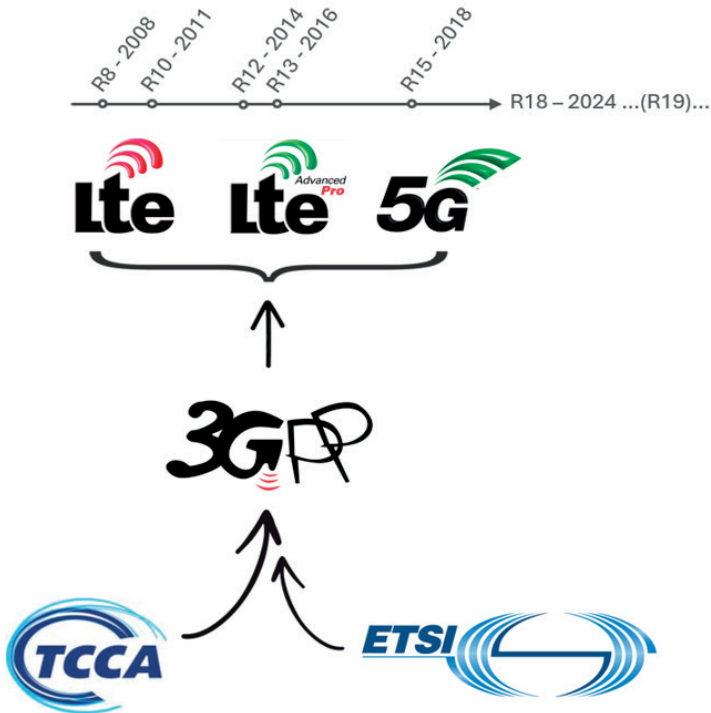


Figure 2 : Naissance du haut débit critique LTE Pro (Source : Hub One).

En parallèle, le 3GPP développait les standards des réseaux mobiles grand public (GSM, 3G, LTE(4G)), sans besoin d'intégrer de fonctionnalités critiques (appels de groupe, *push-to-talk*, priorité/préemption, mode isolé...).

Est né de ce constat le TCCA (TETRA and Critical Communications Association) renommé depuis The Critical Communications Association. Sous son impulsion et à travers l'ETSI, le monde des communications critiques a influencé le 3GPP afin d'intégrer ces exigences dans les standards LTE.

Dans les années 2015, les versions 12 et 13 commençaient à intégrer les premières fonctionnalités critiques, dont le MCPTT (Mission Critical Push-To-Talk) utilisé pour avoir la possibilité d'utiliser des *talkies-walkies* sur un réseau 4G.

Les Aéroports de Paris se sont engagés dans cette dynamique dès 2013, avec l'objectif de converger vers une technologie unique, pérenne, capable de remplacer les réseaux TETRA, DMR, DECT, *wifi* et les liaisons *machine-to-machine*.

Au sein des services d'innovation, un grand programme d'étude pluriannuel de sept ans a permis de préparer cette transition. Il a inclus plus de trois expérimentations en conditions réelles, des consultations continues auprès des équipementiers ainsi que des échanges avec l'ARCEP pour envisager le spectre.

## Enjeux budgétaires



Figure 3 : La balance des coûts d'un réseau critique disponible (Source : Hub One).

Le déploiement d'un réseau mobile critique à large bande, d'un niveau *carrier grade*, implique des investissements importants. La mutualisation des usages constitue un levier essentiel pour en assurer la viabilité économique.

L'objectif est de rassembler les différents utilisateurs sur une infrastructure commune, incluant les acteurs aéroportuaires, les partenaires industriels et les services régaliens.

Le réseau TETRA rassemblait plus de 3 500 utilisateurs, le DECT en comptait 5 000 et les partenaires principaux en représentaient plus de 5 000 également.

À terme, le réseau vise environ 50 000 cartes SIM actives, réparties entre la migration des usages existants et le développement de nouveaux services (pour une répartition d'environ 50/50).

Par ailleurs, la montée en compétence technique est significative pour accéder à la technologie. Elle concerne l'ensemble des composantes du réseau : accès radio RAN (Radio Access Network), cœur de réseau, applications (dont le MCPTT), cybersécurité et exigences réglementaires. Cette évolution transforme en profondeur les métiers, nécessitant désormais des équipes pluridisciplinaires de haut niveau (on parle d'une centaine d'ingénieurs).

Ces grandes thématiques cartographiées dans la Figure 4 s'inscrivent dans une dimension normative supérieure, induisant plus d'efforts de suivi des évolutions, d'opérations conséquentes de montées en version, avec de forts impacts sur les contrôles de non-régression fonctionnelle. Cela concerne toute la chaîne, du serveur au terminal, chacun évoluant dans son propre écosystème logiciel.

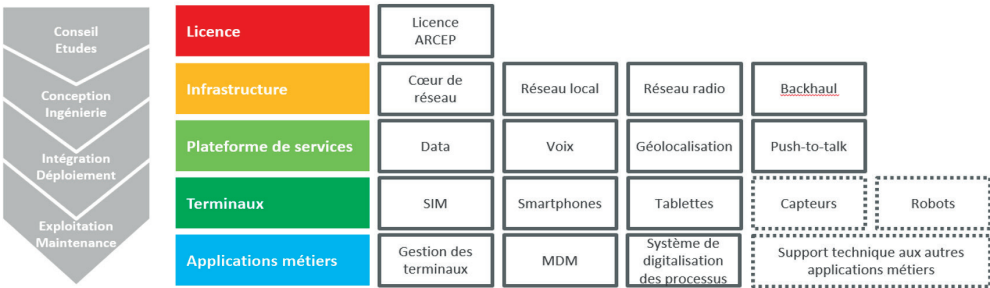


Figure 4 : Cartographie des métiers pour concevoir et opérer un réseau 4/5G professionnel (Source : Hub One).

## Risques industriels

La transition vers les nouvelles technologies implique des défis techniques majeurs, notamment liés à la propagation radio. Les fréquences utilisées en 4G et 5G professionnelles en France (2,6 GHz et 3,8–4,2 GHz) présentent des caractéristiques très différentes de celles des réseaux privés historiques en bande 400 MHz principalement, avec une sensibilité accrue aux obstacles. Aucune régression n'est envisageable.

L'environnement aéroportuaire, particulièrement complexe et varié, nécessite une conception sur mesure. Sur une petite surface on concentre tous les cas d'un réseau de taille nationale : les plaines des pistes, l'environnement urbain des aéroports, les zones techniques, les espaces publics *indoor*, et même encore, le *cockpit* et la soute avionique isolée pour la protection des rayonnements cosmiques en altitude. Tous ces espaces opérationnels sont utilisés depuis longtemps et sont à prendre en compte sans impasse.

Contrairement aux réseaux publics, il n'est pas possible de s'appuyer principalement sur des modèles statistiques ajustés avec le temps selon des indicateurs de performances. Des ingénieries spécifiques sont nécessaires et sont soumises à des risques de résultat dès la mise en service. Des ingénieries spécifiques et pointues sont nécessaires afin d'obtenir des performances robustes dès la mise en service ce qui induit un processus plus structuré, exigeant et engageant.

Du fait de ces spécificités, le déploiement requiert l'utilisation de fonctionnalités avancées dès les premières phases. On parlera des techniques de combinaison de cellules pour éviter les interférences dans les zones très rapprochées, de l'activation du SON (Self Optimized Network) pour établir les premières configurations stables en performances et mobilité, du *split* de cellule pour alimenter des grandes architectures DAS (Distributed Antenna System) en *indoor*, ou encore de la mise en place de MIMO entrelacé (Multiple-Input Multiple-Output) afin d'offrir les performances MIMO sur des architectures DAS croisées en SISO (Single Input Single Output) réutilisées et déjà en place depuis plusieurs années.

Par ailleurs, la migration des terminaux constitue un enjeu critique. Les nouveaux équipements doivent conserver les qualités des anciens systèmes (robustesse, simplicité, ergonomie, autonomie, qualité audio) tout en intégrant de nouvelles fonctionnalités. Leur adoption nécessite une adaptation des usages et des pratiques.

Enfin, les cycles de mise à jour des systèmes d'exploitation introduisent de nouvelles contraintes en matière de maintenance et de continuité de service. Une organisation prend alors en compte tous les types de terminaux utilisés afin de les évaluer dans leurs évolutions et leurs positions dans le parc. Cette activité cruciale doit se faire sans interruption de service.

Ce sont les nouvelles dimensions de l'opérateur d'un grand réseau mobile professionnel.

## LE DÉPLOIEMENT DE LA 5G SUR LES PLATEFORMES AÉROPORTUAIRES

À l'issue des phases d'expérimentation, de pré-designs et de business plan, deux bandes de fréquences de largeur 20 MHz ont été attribuées en 2020 par les autorités de régulation. Deux ans plus tard, la première carte SIM était en exploitation sur la plateforme de Paris-Orly. Un an après les premières flottes mobiles de Paris-Charles de Gaulle étaient à leur tour en service.

### Déploiement de l'infrastructure

Le réseau repose sur une combinaison d'une soixantaine de sites radioélectriques macrocellulaires et de plus de 90 métrocellules (plus petites antennes localisées), permettant de couvrir à la fois les zones étendues et les points de forte densité (architecture hétérogène dite *hetnet*).

L'intégralité de la zone *outdoor* représente une surface à couvrir de 55 km<sup>2</sup> sur les deux aéroports Paris-Charles de Gaulle et Paris-Orly.

Les infrastructures *indoor* ont été entièrement modernisées, couvrant l'immensité des aéroports, représentant plus de 1,8 million de m<sup>2</sup>, allant jusqu'à des zones techniques au cinquième niveau de sous-sol.

Le cœur de réseau est redondé géographiquement entre les aéroports, garantissant une haute disponibilité. Il intègre de nombreuses couches applicatives, dont les services de voix sur LTE (VoLTE) associés à un cœur IMS (Information Management System) et les mécanismes de sécurité avancés.

La Figure 5 représente ce qui a été mis en place depuis l'automne 2022.

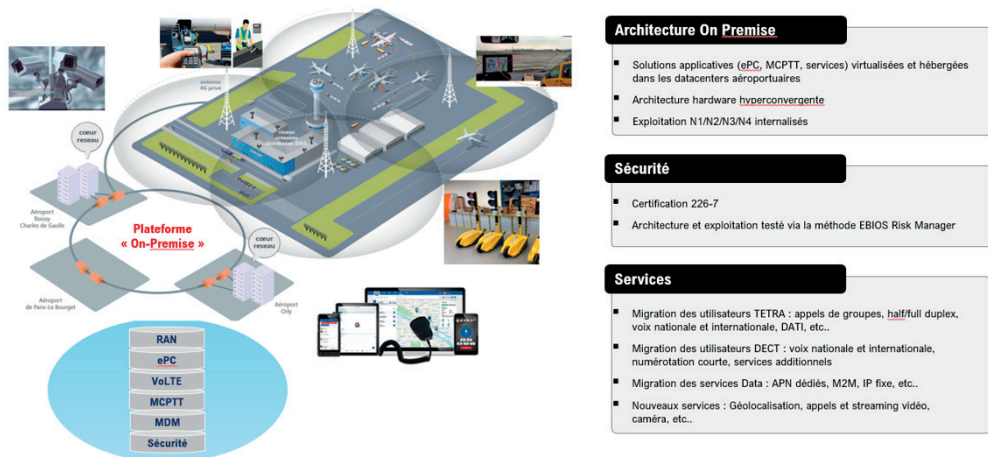


Figure 5 : Architecture réseau mobile privée des Aéroports de Paris (Source : Hub One).

### Migration des flottes et des usages, la conduite du changement

Ce changement technologique impacte fortement le sujet des terminaux ainsi que la qualification précise des usages, selon deux axes principaux : la migration des flottes existantes et le développement de nouveaux usages.

La migration des terminaux déjà en service constitue une opération majeure. Elle requiert une analyse préalable méticuleuse et systématique des processus propres à chaque métier. Les équipements de remplacement relèvent d'une génération technologique très différente, ce qui implique que la transposition des méthodes existantes soit étroitement concertée entre les spécialistes des terminaux et les équipes opérationnelles.

Il s'agit notamment de qualifier les différentes interfaces homme-machine, tant logicielles que matérielles, de vérifier l'accessibilité et l'utilisabilité des "soft keys" en toutes circonstances, de comparer les performances des codecs voix et d'en analyser les impacts sur les opérations en conditions réelles. Par ailleurs, les nouvelles ergonomies doivent être étudiées et adaptées aux différents contextes de travail.

Lors de la phase de migration effective, le recours aux passerelles inter-technologies s'est finalement révélé limité. La migration par flotte métier s'est imposée comme l'approche la plus efficace. Chaque groupe d'utilisateurs a ainsi fait l'objet d'un projet dédié, intégrant une planification fine afin de garantir la continuité de service, malgré les volumes importants de matériel à déployer.

Cette démarche s'est accompagnée d'un effort soutenu d'accompagnement des utilisateurs finaux et de leurs responsables opérationnels. Des utilisateurs référents, préalablement désignés pour les phases de test, ont été chargés de valider les solutions et de donner les feux verts nécessaires.

Enfin, la diffusion de l'information et la conduite du changement ont joué un rôle déterminant, permettant de faire évoluer des pratiques solidement ancrées vers de nouveaux réflexes adaptés aux outils et aux usages émergents.

## **Le partage du spectre, une première en France**

Les projections technologiques ainsi que les échanges relatifs à l'obtention du spectre alloué ont été menés en collaboration avec l'un des principaux partenaires et acteurs des plateformes aéroportuaires.

La proximité et l'imbrication des zones géographiques d'exploitation ont rapidement mis en évidence une incompatibilité d'une éventuelle cohabitation spectrale. En effet, et plus particulièrement en technologie TDD (Time Division Duplexing), les bandes de fréquences adjacentes doivent être isolées afin d'éviter toute interférence, au risque de dégrader fortement les performances, voire de provoquer une perte de service. L'ARCEP a depuis publié des règles de cohabitation visant à encadrer précisément les contraintes à respecter.

Pionniers face à cette contrainte technique dans les nouveaux réseaux mobiles privés à haut débit, les principes de RAN sharing ont été mis en place dès le départ. Il s'agit d'un mécanisme de mutualisation du spectre, déjà utilisé dans certaines zones blanches du territoire français par les opérateurs publics. Ce principe consiste à exploiter un même support radio pour deux PLMN (Public Land Mobile Network), c'est-à-dire deux identités de réseau distinctes, rendues accessibles aux utilisateurs concernés sur des ressources radio partagées logiquement.

Des mécanismes de gestion de priorité et de garanties de performance minimale ont été instaurés afin de garantir à chaque réseau un service critique déterministe, quelle que soit la charge instantanée. Ce modèle permet ainsi d'exploiter la totalité de la capacité spectrale disponible sans générer d'interférences entre deux réseaux colocalisés.

Ce dispositif, bien que complexe à mettre en œuvre entre les différentes parties prenantes, apparaît initialement comme un cas particulier de réseau mobile privé. La complexité technique n'en constitue pas le principal frein. Avec le recul, ce modèle semble disposer d'un potentiel important, notamment dans les environnements caractérisés par une forte

densité industrielle, où les besoins en spectres contigus ou imbriqués sont appelés à se multiplier – ce qui est déjà le cas aujourd’hui.

Par ailleurs, l’ouverture récente d’une seconde bande de fréquences plus élevée (bande 77, 3,8–4,2 GHz) contribue à enrichir le débat autour du RAN sharing, notamment en raison de sa largeur importante. Elle permet d’accueillir davantage d’utilisateurs proches les uns des autres sans partage. Toutefois, les contraintes physiques liées à la propagation des ondes dans cette gamme de fréquences limitent les possibilités d’exploitation et peuvent augmenter les coûts. L’équation est donc assez complexe.

## BILAN ET PERSPECTIVES

Un peu plus de 2 ans auront été nécessaires pour mettre en place toutes les infrastructures et commencer la distribution des terminaux mobiles de nouvelle génération. Aujourd’hui les anciens réseaux sont arrêtés, la quasi-totalité des flottes ont été migrées et les nouvelles infrastructures sont pleinement opérationnelles. La nouvelle ère du haut débit à usage critique est en plein essor sur les plateformes aéroportuaires de Paris.

### Un des plus grands réseaux mobiles privé de France en opération

Plus de 30 000 cartes SIM sont aujourd’hui en service pour des usages voix et données. On recense majoritairement des terminaux mobiles durcis, ainsi que des systèmes de type *machine-to-machine* intégrés dans de nombreux processus.

Parmi les principaux cas d’usage, on peut citer :

- Le personnel au sol qui assure la gestion des aéronefs au point de parking ou en aérogare, avec plusieurs dizaines de processus désormais entièrement numérisés et des communications de groupe instantanées.
- Les véhicules de piste géolocalisés qui transmettent leur position en temps réel afin de permettre la gestion de l’anticollision sur l’ensemble des aires de mouvement. L’application, exclusive et propriétaire des Aéroports de Paris, exploite une couverture fiable, y compris dans les tunnels, c’est-à-dire en dehors de la couverture GPS et sous couverture mobile *indoor*.
- Les automates industriels qui assurent le pilotage de la signalisation des *taxiways* lors des opérations de travaux.
- Les engins de déneigement communiquent entre eux afin d’évacuer le manteau neigeux d’une piste de plus de 4 km de long en moins de 30 minutes, dans des conditions météorologiques sévères.
- Les chantiers mobiles disposent d’une connectivité permanente pour l’ensemble de leurs usages informatiques et téléphoniques.

Les usages portés par la 5G contribuent à soutenir une activité soutenue, avec plus de 1 800 mouvements d’avions quotidiens et l’accueil de plus de 107 millions de passagers en 2025. Ce niveau de trafic positionne les aéroports parisiens parmi les trois principaux *hubs* européens, tout en les plaçant au premier rang au sein de l’Union européenne, et en consolidant leur statut de référence en matière de qualité de service.

### Des performances et une fiabilité reconnue

La couverture est désormais intégrale (supérieure à 97 % de la surface *outdoor*, notamment) pour les usages actuels. Des densifications seront réalisées progressivement, en fonction des besoins spécifiques, notamment dans les galeries techniques profondes, les

sous-sols, ou encore en cas de fortes charges ou de débits extrêmes. On observe aisément des débits descendants supérieurs à 100 Mbps, conformes aux performances attendues de la technologie au regard de la largeur de bande allouée.

La qualité la plus largement et spontanément reconnue par les utilisateurs est la mobilité, caractéristique essentielle d'un réseau 3GPP. Le temps des coupures de liaison difficiles à maîtriser est révolu. Les applications restent connectées en permanence. Avec la nouvelle confiance acquise par les utilisateurs, il devient possible d'étendre les fonctionnalités applicatives, de développer des architectures de *cloud* privé plus modernes et de déployer des approches de *edge computing*, ouvrant ainsi la voie à une digitalisation beaucoup plus avancée.

La fiabilité a été validée en conformité avec les moyens mis en œuvre, avec des taux atteignant 99,99 % de disponibilité (contre environ 99,9 % dans les standards grand public).

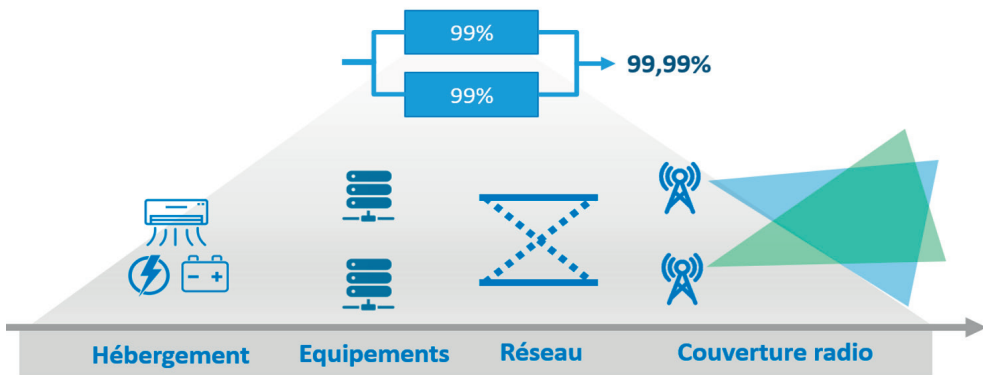


Figure 6 : Composantes de la résilience (Source : Hub One).

Le réseau a démontré ses performances dans des situations réelles de criticité, en complément des pics d'activité quotidiens et des cycles de forte affluence liés aux périodes de congés, par exemple.

Il a notamment affiché une stabilité sans faille lors des deux sessions des Jeux olympiques, puisque plus de 21 000 sessions de communication actives ont été enregistrées chaque jour, plus de 280 000 établissements de connexions quotidiens avec un taux de réussite supérieur à 98,9 %, moins de 0,8 % de congestion et sans aucune alarme ni anomalie.

Il a également supporté sans dégradation plusieurs exercices de coupure générale d'alimentation électrique sur les aéroports.

Il s'agit, de manière générale, d'un résultat particulièrement probant, permettant d'affirmer la disponibilité d'un véritable réseau mobile critique à haut débit.

## Vers les nouveaux usages

Lorsque le moyen de communication est réputé disponible et reconnu, les expressions de besoin et les idées concrètes de nouveaux usages émergent naturellement.

Une part importante de ces usages concerne le domaine de l'IoT, véritable catalyseur de l'aéroport connecté, puis du *Smart Airport*. Si les capteurs sont aujourd'hui encore coûteux et parfois complexes à déployer, il est attendu que ces contraintes puissent être progressivement levées afin d'élargir significativement l'échantillonnage géographique

des mesures de toute nature, dans le but de pouvoir piloter en temps réel l'état de l'aéroport. Ce travail s'inscrit, par exemple, dans l'établissement du nouveau jumeau numérique des plateformes enrichi en permanence par des données temps réel.

L'activité aéroportuaire est fortement réactive, en fonction des horaires et des événements. Il s'agit d'un environnement particulièrement dynamique, dont l'un des principaux enjeux est de s'adapter en permanence à ces évolutions, afin d'améliorer l'expérience passager, d'optimiser la qualité de service et les coûts associés, tout en garantissant sans aucun compromis la sécurité. Ces performances contribuent directement à l'attractivité des plateformes aéroportuaires dans un contexte international.

Par ailleurs, en tant qu'OIV (Organisme d'Importance Vitale), les infrastructures doivent permettre l'accueil des communications des autorités, notamment le RRF (Réseau Radio du Futur), y compris dans les zones les plus reculées des bâtiments, là où aucune couverture réseau n'est habituellement disponible.

Les processus logistiques sont également fortement concernés par ces évolutions. La gestion des bagages constitue un enjeu majeur. Aéroports de Paris dispose d'une expertise reconnue dans ce type de traitements automatisés, et l'extension des AGV (Automatic Guided Vehicles), nécessitant une connectivité critique, représente un défi important. De nombreux cas d'usage liés à la sécurité et à la sûreté sont par ailleurs étudiés (engins autonomes de surveillance, de calibration, d'inspection technique).

De nombreux autres projets sont identifiés et requièrent tous des performances accrues, souvent localisées. L'ouverture de nouvelles bandes de fréquences devient nécessaire, et le cas de la bande 77 est particulièrement intéressant. Des solutions de densification locales (*hotspots*) à très haut débit sont étudiées afin de permettre, par exemple, des zones de déchargement massif de données (transfert de données de vol d'aéronefs, déchargement enregistrements vidéo des trains automatiques inter-terminaux, etc.). On remarquera que les usages professionnels sont très souvent en sens montant, c'est-à-dire un échange depuis le mobile vers le réseau, ce qui est un facteur limitant.

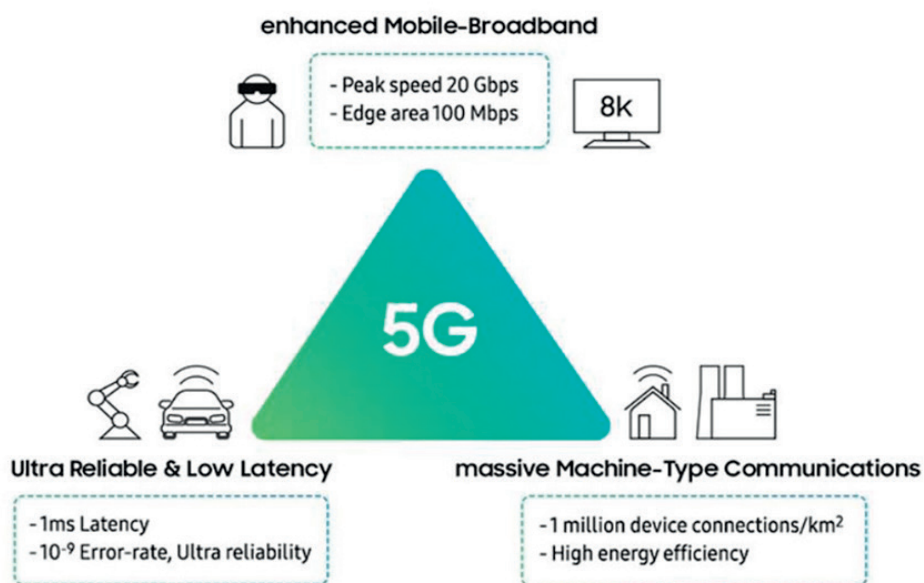


Figure 7 : Catégorisation des usages 5G (Source : Samsung.com).

Le réseau évoluerait alors vers une architecture multibande, exploitant l'agrégation de canaux et ouvrant de nouvelles perspectives. Toutes ces fonctionnalités suivent l'évolution la normalisation 3GPP dont les usages sont nativement intégrés dans la 5G à travers des *slices* communément catégorisés en trois familles principales (voir la Figure 7 page précédente).

## BIBLIOGRAPHIE

### Monographies

DAHLMAN E., PARKVALL S. & SKÖLD J. (2016), *4G, LTE-Advanced Pro and the road to 5G*, London, Academic Press.

LIEBHART R., CHANDRAMOULI D., WONG C. & MERKEL J. (2015), *LTE for public safety*, Chichester, Wiley & Sons.

ACHARYA J., GAO L. & GAUR S (2014), *Heterogeneous Networks in LTE-Advanced*, Chichester, Wiley & Sons.

### Articles et livres blanc

OLSZANSKI S., PIVOT E., MUNEROT F., DUFOUR P. & PUJOL F. (2014), « 4G critique et professionnelle vers le haut débit mobile », Livre blanc, Hub One & l'Idate.

WILLIAMSON R., D'ARIA G. & YN LI R. (2022), « 5G TDD Uplink », NGMN Alliance.

GSMA (2020), « 5G Synchronisation TDD Questions et Réponses, Recommandations pour la coexistence des réseaux TDD dans la gamme de fréquence 3,5 GHz », GSMA.

DEMAREZ A. (2021), « La régulation du spectre », ANFR.

# 5G et défis du transport ferroviaire en Europe

Par Marion BERBINEAU

Directrice de recherche à l'Université Gustave Eiffel

La modernisation des systèmes de communication ferroviaire en Europe est un enjeu clé pour répondre aux défis de sécurité, d'efficacité et d'interopérabilité. L'ERTMS (European Rail Traffic Management System), déployé depuis les années 1990, a permis d'augmenter la capacité des lignes de 25 % grâce à trois composants principaux : l'ETCS (système de contrôle des trains), le GSM-R (réseau radio basé sur la 2G), et l'ATO (automatisation de la conduite, optionnel). Cependant, l'obsolescence programmée du GSM-R, dont le support cessera vers 2035, impose une transition vers le FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), basé sur la 5G.

Le FRMCS, en cours de standardisation et de développement, doit garantir la continuité des applications critiques (signalisation, contrôle-commande) tout en permettant de nouveaux services (maintenance, vidéo-surveillance, trains autonomes). L'Europe joue un rôle central dans le financement et la coordination du FRMCS, *via* des projets collaboratifs. Cet article dresse un panorama des différents développements au niveau européen.

*Je remercie Stéphane Guillemaut, chef de la section  
I&S-Ingénierie et Architecture Système  
à SNCF-Réseau, d'avoir accepté de relire cet article.*

## L'ERTMS POUR UN TRAFIC FERROVIAIRE FLUIDE, RÉGULIER ET INTEROPÉRABLE

La signalisation ferroviaire, système essentiel pour la sécurité et l'efficacité du réseau ferroviaire, repose sur des signaux visuels, sonores et électroniques, qui transmettent des informations précises aux conducteurs et aux agents. Dès 1872, les premiers systèmes de transmission entre le sol et les trains, ont été conçus pour répéter la signalisation latérale à bord pour le conducteur. Les besoins en transmissions sans fil se sont ensuite multipliés avec la complexité croissante du contrôle/commande des trains (Berbinau, 2001). Trois fonctions vitales doivent être assurées : communiquer, localiser, surveiller.

Dans les années 1990, deux directives européennes (91/440/CEE et 96/48/CEE) ont imposé la séparation des activités d'exploitation et de gestion d'infrastructure, ainsi que l'interopérabilité du réseau à grande vitesse. L'ERTMS (European Rail Traffic Management System), né de cette impulsion avec les financements européens et nationaux, permet d'augmenter la capacité des lignes de 25 %, en optimisant l'espacement des trains et en garantissant une vitesse maximale adaptée. Son déploiement, en cours, doit couvrir

100 % des lignes à grande vitesse d'ici 2040 (note-deploiement24). L'ERTMS comprend deux éléments fondamentaux et un troisième optionnel :

- L'ETCS (European Train Control System), système européen de signalisation et de contrôle des trains.
- Le GSM-R, le système radio pour l'échange des informations entre le sol et le bord. Basé sur le standard GSM (2G), il utilise des fréquences propres au rail (876 MHz – 880 MHz pour le lien montant et 921 MHz – 925 MHz pour le lien descendant) harmonisées au niveau européen pour un fonctionnement interopérable. Le GSM-R a été choisi par 38 pays à travers le monde, incluant tous les États européens, ainsi que des pays d'Asie, d'Eurasie et d'Afrique du Nord.
- L'ATO (Automatic Train Operation), optionnel, permet la traction et le freinage automatique du train. Quatre niveaux d'automatisme sont définis (Chaumette, 2020).

La mise en œuvre de l'ERTMS nécessite l'installation d'équipements spécifiques :

- Le Radio Block Centre (RBC) est connecté avec le poste d'aiguillage. *Via* le GSM-R, il reçoit les rapports de position émis par le train et, en fonction des contraintes exprimées par l'enclenchement, envoie au train son autorisation de marche. La vitesse à respecter et les éventuelles courbes de décélération sont alors affichées au conducteur.
- L'European Vital Computer (EVC) embarqué contrôle les données transférées et la vitesse maximale autorisée.
- Les systèmes de transmission courte portée, Eurobalises déployées sur les voies sont télé-alimentées (27 095 MHz) par le train. Elles transmettent (4 234 MHz) une information de localisation pour recalculer l'odométrie du train et éventuellement d'autres informations fixes ou dépendantes de conditions locales.
- Le GSM-R véhicule les échanges de données entre le RBC, le train, les postes de signalisation et de régulation (par échanges vocaux entre le conducteur et les équipes au sol).

Cinq fonctionnalités vitales spécifiques ont été développées pour les opérations ferroviaires et font aujourd'hui partie de la norme GSM phase 2+. Elles sont connues sous le nom de fonctionnalités ASCI (Advanced Speech Call Items) :

- L'adressage fonctionnel (variante du service "Follow me" du GSM) consiste à identifier la fonction de l'utilisateur plutôt que le numéro du terminal radio de l'utilisateur.
- L'adressage en fonction de la localisation de l'utilisateur permet d'établir un appel en tenant compte de l'adressage fonctionnel et de la position du terminal appelé dans le réseau.
- L'appel vocal radiodiffusé permet de générer un message vocal de service à un groupe d'abonnés et cela dans une zone prédéfinie appelée « zone d'appel de groupe » qui peut être constituée de plusieurs cellules et être gérée par plusieurs stations de base ou parties du réseau.
- L'appel de groupe permet des appels vocaux au sein d'un groupe d'utilisateurs prédéfini dans un mode semi-duplex à l'intérieur de la zone d'appel de groupe.
- L'attribution de niveaux de priorité aux communications qui autorise la préemption éventuelle des ressources radio en fonction de ces niveaux de priorité.

Conçu il y a plus de 20 ans, le GSM-R s'appuie sur la 2G et offre une interopérabilité totale au-delà des frontières. Il est déployé sur plus de 130 000 km de voies en Europe (avec 90 000 radios embarquées en service) et sur quelques 210 000 km à l'échelle mondiale. Cependant, l'extinction des technologies 2G et 3G est connue depuis 2022 pour un basculement total vers les réseaux 4G et 5G (BEREC, 2023), induisant ainsi l'obsolescence

imminente du GSM-R, qui constitue un risque au niveau européen (et mondial) pour la continuité de l'ERTMS ferroviaire et d'autres applications ferroviaires (fin du support prévue vers 2035).

## LE FUTURE RAILWAY MOBILE COMMUNICATION SYSTEM (FRMCS)

Le FRMCS est en cours de développement au niveau européen pour prendre le relai du GSM-R dès 2035 (2032 en France selon UIC, 2023a). Grâce à la 5G, il apportera de la flexibilité aux services de télécommunication ferroviaire. Son déploiement en Europe concerne 150 000 km de voies ferrées équipées du GSM-R et de l'ERTMS, dont seulement 23 000 km sont des lignes à grande vitesse.

La décision ECC 20 (02) (CEPT), ratifiée par les États en 2021, a confirmé les bandes 900 MHz (5,6 MHz en FDD-Frequency Division Duplex, bande n100) et 1 900 MHz (ou bande n101, appelée RMR1900, 10 MHz en TDD-Time Division Duplex) pour l'interopérabilité ferroviaire et l'exploitation du FRMCS. Le GSM-R et le FRMCS devront cohabiter dans la bande 900 MHz pendant la phase de transition. À l'heure où le ferroviaire doit devenir le mode de transport alternatif aux modes plus polluants comme la route et l'aérien, l'utilisation des réseaux mobiles des opérateurs, prévue par le standard FRMCS, est sans doute une solution pour répondre à cet enjeu.

## LES TECHNOLOGIES CLEFS POUR LE FRMCS

Le FRMCS doit remplacer le GSM-R, qui a fait ses preuves, et garantir le fonctionnement continu des applications métier malgré l'évolution des systèmes de télécommunications. Il faut donc décorréler les couches applicatives et les couches radio du système. Par ailleurs, le passage à la 5G permet la mise en place de services numériques pour les différents métiers et applications que le GSM-R ne pouvait pas satisfaire (maintenance, travaux le long des voies, déploiement de réseaux de capteurs, vidéo surveillance, ATO, train autonome, téléconduite des trains...). Ces applications requièrent des débits très élevés, une latence extrêmement faible, une robustesse et une résistance aux interférences. L'ETSI 3GPP TS 22.289 V17.0.0 (ETSI, 2022) détaille les différents besoins en termes de performances des applications ferroviaires critiques et non critiques. Les cas d'usage FRMCS sont décrits dans (UIC, 2023b). La satisfaction de tous ces besoins repose sur plusieurs mécanismes et technologies clés qui ont conduit au choix de la 5G et des services MCX (les services Mission Critical permettent de gérer des communications critiques en garantissant haute disponibilité, faible latence, priorité, sécurité et interopérabilité) pour le standard FRMCS.

## L'interopérabilité européenne

L'interopérabilité européenne du système est garantie *via* le choix de technologies de télécommunications (5G, 6G, MCX) définies par des organismes comme le 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) et l'ITU (International Telecommunication Union). Les équipements et logiciels de différents fabricants peuvent fonctionner ensemble, même après des mises à jour ou des évolutions technologiques.

## Le *Network Slicing* (segmentation réseau)

Le *Network Slicing* permet d'isoler les services. Chaque application métier différente peut être isolée dans une *slice* virtuelle et indépendante avec des qualités de service différentes. Ainsi, une mise à jour ou une évolution du réseau n'affectera pas nécessairement toutes

les *slices* en même temps. Les applications critiques pour le contrôle-commande peuvent continuer à fonctionner sur leur *slice* dédiée, même si d'autres parties du réseau évoluent.

### Virtualisation du réseau

Dans la 5G, les fonctions réseau (comme les routeurs, pare-feu, etc.) sont virtualisées et exécutées sur des serveurs standard (NFV), plutôt que sur du matériel dédié. Cela permet de mettre à jour ou de remplacer une fonction réseau sans interrompre le service global. Par ailleurs, les applications métier sont souvent déployées dans des conteneurs (Docker, Kubernetes), qui isolent l'application de l'environnement sous-jacent. Cela facilite les mises à jour et les migrations sans interruption de service.

### L'orchestration et l'automatisation

L'orchestration et l'automatisation dans la 5G permettent de gérer dynamiquement les ressources réseau et d'ajuster les configurations en temps réel, sans interruption pour les applications métier. Enfin, en rapprochant le traitement des données des utilisateurs finaux (*via* des serveurs *edge* ou *edge computing*), les applications métier deviennent moins dépendantes du cœur de réseau, ce qui va limiter l'impact des évolutions centrales. La sécurité et le chiffrement peuvent être garanties par la 5G avec un chiffrement de bout en bout garantissant l'intégrité et la confidentialité des données des applications même en cas de changement d'infrastructure réseau. Les mécanismes d'authentification et d'autorisation dans la 5G assurent que seules les applications autorisées peuvent accéder aux ressources réseau, même après une évolution du système. Enfin, la 5G doit garantir la rétrocompatibilité et la migration progressive.

### La cohabitation du GSM-R et du FRMCS dans la bande 900 MHz

Une première approche (à l'étude au 3GPP), consiste à co-localiser les deux systèmes dans la même bande *via* un réaménagement du spectre GSM-R pour libérer une portion de la bande dans laquelle un système 5G à bande étroite peut fonctionner (Hooli, 2023). La deuxième approche, ou "White space" (Kontron), consiste à opérer les deux systèmes dans la même bande en détectant les fréquences non utilisées par le GSM-R pour les allouer au FRMCS (Holfeld, 2024). La solution (Aboud, 2025) alloue des ressources aux différents types de trafic FRMCS pris en compte (critique et performance) sur la même bande de fréquences que le système GSM-R en utilisant le mécanisme de préemption du standard 5G NR dans le cadre du concept "White space". Pour ces approches, des techniques avancées d'allocation des ressources radio sont nécessaires.

### Réseaux FRMCS hybrides

Afin d'accroître la résilience et la disponibilité, mais aussi d'offrir une augmentation de la capacité et d'améliorer la couverture globale, le réseau FRMCS peut être hybridé avec des réseaux mobiles 5G publics, anticipant ainsi un des principes de la future 6G. L'hybridation repose sur le « Multipath » au niveau IP qui permet d'utiliser plusieurs trajets de transmission indépendants pour mettre en œuvre des politiques individuelles pour toutes les applications ferroviaires, y compris la diffusion vidéo en continu et les communications de groupe (Holfeld, 2024), (Moessner, 2024).

### RÔLE DE L'EUROPE POUR LE DÉVELOPPEMENT DU FRMCS

L'Europe et les États jouent un rôle majeur dans le financement des développements du FRMCS. L'Union Internationale de Chemins de fer (UIC) coordonne les travaux

avec les industriels, les gestionnaires d'infrastructure et quelques universités et centres de recherche. La première version des Spécifications Techniques d'Interopérabilité du FRMCS, produite par l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA), a été publiée en 2023. Une deuxième version est attendue pour 2027 au plus tôt. Le début de déploiement de lignes expérimentales a commencé en 2025 dans plusieurs pays européens, dont l'Allemagne et la France.

Les projets collaboratifs européens en lien avec le FRMCS sont nombreux, en particulier dans le cadre des entreprises communes, ou Joint Undertaking (JU) Shif2rail puis Europe's, mais aussi du programme ICT2020 et de la JU SNS (Smart Networks and Services).

Les premiers projets ont posé les bases conceptuelles pour un système de communication ferroviaire basé sur la 5G (Release 17), en insistant sur l'interopérabilité, la sécurité et la capacité à supporter des applications critiques (comme l'ETCS et l'ATO) (Projet X2RAIL-1). Le concept de l'Adaptative Communication System (ACS) permettant l'intégration de différentes technologies de communication (4G, 5G, *wifi*, satellite) dans un même écosystème, a été développé (Allen, 2018). L'ACS sépare la couche de transmission radio de la couche applicative (signalisation, communication voix). Ce concept est repris dans le FRMCS. Un Profil de Protection (PP) pour le ACS Gateway (ACS GW) a été défini (Projet X2RAIL-3) en se basant sur la norme IEC 62443-4-2 (niveau de sécurité 3), notamment pour les applications de protection automatique des trains et les services de communication sans fil pour les passagers. L'intégration de mécanismes de sécurité avancés (Projet X2RAIL-5) est en ligne avec les exigences du Cyber Resilience Act européen, pour protéger les communications ferroviaires contre les cyberattaques.

Pour tester le FRMCS en laboratoire, différentes plateformes ont été développées. Le projet EMULRADIO4RAIL a développé le principe de plateformes d'émulation "Hardware In the Loop" pour simuler des scénarios réels et évaluer les performances de l'ACS (Berbiveau, 2023). Le projet AB4RAIL (Alternative Bearers for RAIL) a étudié les possibles technologies alternatives, telles que le satellitaire en complément du FRMCS terrestre (Guliano, 2021). Le projet ICT2020 5GRAIL a contribué à développer des premiers prototypes FRMCS. Une nouvelle architecture du système embarqué, ou TOBA system (Train On Board Architecture), a été définie et testée en laboratoire et sur des sites réels en France et en Allemagne (Sahlab, 2024). La question du partage des infrastructures 5G avec d'autres modes de transport (route, rail urbain) a aussi été étudiée (Sylla, 2023). En parallèle, le projet ICT2020 5GMED a fait la démonstration de la mobilité coopérative, connectée et automatisée avancée (CCAM) et des services FRMCS le long du corridor transfrontalier « Figueras-Perpignan » entre l'Espagne et la France.

La JU Europe's Rail et la JU SNS ont lancé en 2024 pour 3 ans, le projet MORANE 2 (MOBILE Radio for Railways Networks in Europe) pour tester et améliorer les produits FRMCS en cours de développement. Le projet MORANE-2 c'est 13 M€ de financement, 26 partenaires et plus de 140 km de voies d'essais en Europe. En Février 2025, Ericsson, Telia et Trafikverket ont réalisé des premiers essais FRMCS sur 40 km de voies en Suède. En Septembre 2025, Nokia a testé le premier réseau 5G NR standalone dans la bande 1 900 MHz le long du site d'essais FRMCS de la DB en Allemagne. En 2026, Ericsson a déployé un réseau FRMCS dans la bande n101 avec DB InfraGO pour tester les services mettant en jeu la sécurité (*mission critical*) pour le contrôle-commande des trains.

En France, le projet 5GCORE piloté par l'IRT B-COM en collaboration avec la SNCF a développé un cœur de réseau 5G et des solutions d'hybridation de réseaux destinées aux applications critiques et industrielles dans le secteur ferroviaire. En parallèle, le projet franco-allemand 5G-RACOM (5G for resilient and green RAIL COMMunication – 2023-

2026) piloté par la DB et la SNCF et financé par la France et l'Allemagne, développe et teste trois solutions spécifiques (Holfeld, 2024) :

- des technologies radio pour la cohabitation GSM-R et FRMCS dans une même bande de fréquences ;
- des solutions d'hybridation du FRMCS avec le réseau 5G public ;
- des modèles de propagation radio pour le déploiement du FRMCS dans les bandes 900 et 1 900 MHz (les modèles 3GPP ne prennent pas en compte les environnements ferroviaires).

Le projet 5GREMORA financé par l'ANR est complémentaire et vise les mêmes objectifs (Berbineau, 2024).

Le déploiement d'une infrastructure 5G NR pour le FRMCS sera très coûteux. Il est aujourd'hui nécessaire qu'une coordination avec les opérateurs publics 5G se mette en place afin d'offrir de la couverture FRMCS sur les lignes secondaires ou en zones urbaines (sur le modèle du RRF). Au sein de la JU Europe's Rail un groupe de travail ciblé sur le déploiement du FRMCS s'est mis en place. Par ailleurs, dans le cadre du Projet S5LECT de l'EUSPA, l'hybridation de la 5G avec les constellations de satellites LEO (Low Earth Orbit) est étudiée et évaluée en laboratoire. Une solution de *edge computing* est aussi proposée. Cette solution d'hybridation des réseaux terrestres et non terrestres ouvre la voie aux évolutions vers la 6G.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'obsolescence programmée du GSM-R et l'urgence de moderniser les infrastructures imposent une transition vers la 5G, porteuse de promesses en termes de performance, de flexibilité et d'innovation. Le FRMCS illustre une transformation majeure pour le secteur, à l'aune des défis technologiques et environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle. À l'horizon 2040, le succès du FRMCS dépendra de sa capacité à concilier innovation technologique, interopérabilité et viabilité économique. La migration vers le FRMCS et l'intégration de la 5G sont des défis technologiques et industriels majeurs pour garantir une mobilité toujours plus sûre et efficace, tout en s'imposant comme un pilier de la transition écologique. Dans ce contexte, la 5G n'est pas seulement une évolution technique, mais un levier stratégique pour repenser la mobilité de demain.

L'intégration de la 5G dans toutes ses innovations technologiques prenant en compte les évolutions vers la 6G, représente aussi un enjeu scientifique et académique majeur, où la recherche fondamentale et appliquée doivent jouer un rôle central. Alors que l'Europe s'engage dans une modernisation ambitieuse de ses infrastructures, les universités et les centres de recherche doivent être des acteurs incontournables pour garantir l'innovation, la sécurité et la pérennité du système. Les projets collaboratifs européens ont déjà démontré l'importance de la recherche académique dans la conception des architectures FRMCS et pour surmonter des verrous technologiques critiques. Pourtant, ces contributions restent souvent sous-financées et fragmentées, alors même que les défis à relever exigent une recherche interdisciplinaire et coordonnée à l'échelle européenne. Il est nécessaire d'accroître les financements des programmes de recherche dédiés, *via* des appels à projets ciblés dans le cadre du prochain Programme cadre européen (FP10), avec la création d'une nouvelle JU dédiée au ferroviaire qui intègre systématiquement une part importante pour de la recherche académique européenne sur des TRL bas dans les feuilles de route technologiques et les financements, notamment sur des sujets comme l'intelligence artificielle pour différentes applications ferroviaires et les réseaux 6G adaptés au ferroviaire. Les gestionnaires d'infrastructures ferroviaires doivent faire face à des défis financiers colossaux pour que le FRMCS devienne une réalité opérationnelle

d'ici 2035. Cela ne doit pas faire oublier le besoin de formation des jeunes pour alimenter les viviers d'ingénieurs et experts de demain ainsi que le besoin d'innovation pour rendre le rail plus attractif et compétitif.

## RÉFÉRENCES

(Aboud, 2025) ABOUD M. A., ZANGAR N., LANGAR R., BERBINEAU M. & MADEC J., “Optimizing Resource Allocation and Scheduling towards FRMCS and GSM-R networks coexistence in Railway Systems”, 2025 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), Dubai, United Arab Emirates, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/GIIS64151.2025.10921737.

(Allen, 2018) ALLEN B., ESCHBACH B., BERBINEAU M. & MIKULANDRA M. (2018), Defining an Adaptable Communications System for All Railways, In proceedings Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft 2018, Lecture Notes in *Computer Science*, vol. 10796, Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90371-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90371-2_6)

(BEREC, 2023), Report on practices and challenges of the phasing out of 2G and 3G, [https://www.berec.europa.eu/system/files/2023-06/BoR%20\(23\)%20111%20BEREC%20Draft%20Report%20on%20practices%20and%20challenges%20of%20the%20phasing%20out%20of%202G%20and%203G.pdf](https://www.berec.europa.eu/system/files/2023-06/BoR%20(23)%20111%20BEREC%20Draft%20Report%20on%20practices%20and%20challenges%20of%20the%20phasing%20out%20of%202G%20and%203G.pdf)

(Berbinau, 2001) BERBINEAU M., Les systèmes de télécommunication existants ou émergents et leur utilisation dans le domaine des transports guidés, Synthèse INRETS N°40 – N°ISBN 2-85782-562-5 – N°ISSN 0768-9756

(Berbinau, 2021) BERBINEAU M., SABRA A., DENIAU V., GRANSART C., TORREGO R. *et al.*, Zero on site testing of railway wireless systems: the Emulradio4Rail platforms. 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Apr 2021, Helsinki, Finland, 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448903 ou hal-03361485.

(Berbinau, 2023) BERBINEAU M., CLAVIER L., SABRA A. KHARBECH S., TORREGO R., SOLER J., VIZZARRI A. & MORENO GARCIA-LOYGORRI J. (2023), IP Impairment Models for Performance Evaluation of Wireless Systems in Railway Environments, *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 6992869938, 10.1109/ACCESS.2023.3292794.

(Berbinau, 2024) BERBINEAU M., SABRA A., PAJUSCO P.E, JAMAL EDDINE AMGHAR, RAFFAELE D ERRICO *et al.*, 5G realistic radio channel models for FRMCS deployment in railway environments. TRA2024: Transport Research Arena, Apr 2024, Dublin, Ireland. hal-04706755

(CEPT) CEPT-ECC Decision (20)02 Harmonized use of the paired frequency bands 874.4-880.0 MHz and 919.4-925.0 MHz and of the unpaired frequency band 1 900-1 910 MHz for Railway Mobile Radio (RMR). [Online] available on: <https://docdb.cept.org/document/16736>

(Chaumette, 2020) Christian CHAUMETTE, Le contrôle/commande ferroviaire, techniques de l'ingénieur, 10 déc. 2020, <https://doi.org/10.51257/a-v1-trp3075>

(ETSI, 2022) 3GPP TS 22.289 version 17.0.0 Release 17, “LTE, 5G, Mobile communication system for railways”, [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/122200\\_122299/122289/17.00.00\\_60/ts\\_122289v170000p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122289/17.00.00_60/ts_122289v170000p.pdf)

(Giuliano, 2021) GIULIANO R., MAZZENGA F., VIZZARRI A. & A. VEGNI M., “Adaptable Communication System (ACS) for Flexible Communications in the Transport Sector: the AB4Rail project experience”, 2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE), Torino, Italy, 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEITAUTOMOTIVE52815.2021.9662924.

(Holfeld, 2024) HOLFELD B., FRITZSCHE R., KARABINOS T., BOISTAULT G., BERBINEAU M. *et al.*, The 5G-RACOM Project: 5G for Resilient and Green Rail COMMUNICATIONS. Transport Research Arena, Apr 2024, Dublin, Ireland. hal-04706750

(Hooli, 2023) HOOLI K. *et al.*, “Extending 5G to Narrow Spectrum Allocations”, in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 41, n°6, pp. 1936-1944, June 2023, doi: 10.1109/JSAC.2023.3273703

(Note-déploiement 2024) Note de synthèse sur le plan de déploiement du système européen de gestion du trafic (ERTMS), <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/202411%20Consultation%20DGITM%20-%20ERTMS.pdf>

(Moessner, 2024) MOESSNER K. & WILLIMOWSKI I., “Architecture of a 5G Mobile Private Network Research Infrastructure for the Future Railway Mobile Communication System (FMRCs)”, *Mobilkommunikation*; 28. ITG-Fachtagung, Osnabrück, 2024, pp. 16-18.

(Salhab, 2024) SALHAB N. & HOLFELD B. (2026), Field Study of FRMCS Use Cases in the 5GRAIL Project, In TRA 2024, Lecture Notes in Mobility. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-032-06763-0\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-032-06763-0_78)

(Sylla, 2023) SYLLA T., MENDIBOURE L., BERBINEAU M., SINGH R., SOLER J. & DITTMANN L., “Implementing Edge Computing Architectures for Railway Applications: An example Using the Emu5GNet Platform”, 2023 IEEE 97<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200145.

(UIC, 2023a) Future Railway Mobile Communication System Requirements Specification, [https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index094\\_-\\_FRMCS\\_SRS\\_%28AT-7800%29\\_v100.pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index094_-_FRMCS_SRS_%28AT-7800%29_v100.pdf)

(UIC, 2023b) Future Railway Mobile Communication System Functional use cases Reference: MG-7900, Version: 2.1.0, [https://uic.org/IMG/pdf/frmcs\\_use\\_cases-mg\\_7900-v2.1\\_0.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/frmcs_use_cases-mg_7900-v2.1_0.pdf)

# La ville connectée et son évolution avec l'arrivée de la 5G

Par Norbert FRIANT

Direction des Services numériques de Rennes Métropole

Le territoire de Rennes Métropole est historiquement positionné sur les technologies numériques grâce à des politiques d'implantation de centres de recherches, d'établissements d'enseignement et d'entreprises de ce secteur. De ce fait, la Ville et la Métropole de Rennes ont développé une culture de l'expérimentation (par essais, erreurs, améliorations continues) avec les différentes parties prenantes (chercheurs, opérateurs, industriels, autorités, associations militantes...) et aussi avec les citoyens, en créant des dispositifs *ad hoc* (Conseil Citoyens du Numérique Responsable). Plusieurs technologies se sont succédées : câble, fibre, Mobile 2G, RFID, TETRA, LoRa WAN, etc.

Aujourd'hui, la 5G fait la promesse de faire converger des fonctionnalités en cherchant à réduire l'empreinte environnementale. De nouvelles questions se posent notamment sur la légitimité pour les collectivités à devenir opérateurs au sens de l'ARCEP ou pour les besoins propres des services publics.

## INTRODUCTION

La Ville et la Métropole de Rennes ont adopté le slogan « Vivre en intelligence » en 1990. Aujourd'hui, à l'heure où le temps passé sur les écrans est devenu la principale occupation pour une majorité de citoyens, de plus en plus fascinés par des IA qui façonnent nos modes de pensée et de création, ce slogan est plus que jamais d'actualité pour engager des transitions sociales, écologiques et démocratiques.

Tous ces usages sont possibles grâce à des infrastructures et réseaux qui se sont cultivés territorialement. Rennes était perçue comme un terreau Télécom avec la création du CCETT (Centre commun d'études de télévision et communications) et de grandes écoles, qui avait été le fruit d'une politique volontariste d'aménagement du territoire.

Rennes Métropole devient dans les années 1980 le « territoire d'excellence » du numérique en France avec le Minitel, Transpac et la télévision numérique.

L'ouverture à la concurrence en 1998 marque une rupture et la collectivité locale doit se saisir de l'aménagement du territoire. Les lois n'arrivèrent qu'en 2004 (art. L.1425-1 du Code général des collectivités). Là encore, Rennes s'est montrée pionnière, avant même la parution des lois en matière de « communications électroniques » en s'autorisant à expérimenter, puis à mettre en production des infrastructures : fibre optique d'initiative publique, réseau radio de type TETRA ou WiMax, Internet des Objets (LoRa), et aujourd'hui les déploiements de la 5G.

Rennes Métropole a soutenu et s'est grandement appuyée sur les compétences du territoire et en premier lieu l'enseignement et la recherche en télécommunications. À travers l'exemple de Rennes Métropole et son historique, cet article vise à souligner les points clés du développement de la ville connectée au-delà du seul besoin de connectivité assuré par une technologie comme la 5G.

## LA MOBILITÉ PREMIÈRE SOURCE DE DONNÉES

### Ouverture des données

L'explosion des pratiques du numérique depuis la fin des années 1990 a vu conjointement se multiplier les données induites. La téléphonie mobile offre des usages au quotidien aux citoyens, et notamment des possibilités de faciliter leurs déplacements dans la ville ou en ruralité.

Vers 2006, l'une des premières expérimentations avec des données de la collectivité sur Rennes avait pour but d'indiquer l'arrivée d'un bus à un arrêt où se trouve une personne déficiente visuelle équipée d'un téléphone mobile (modèle fonctionnant en 2G et équipé d'un GPS) qui recevait une alerte *via* un appel avec une sonnerie dédiée lorsque le bus arrivait à une distance proche de l'arrêt, afin de permettre à la personne de se préparer. Le chauffeur était également prévenu. Il faut savoir que les bus étaient déjà équipés de balises GPS pour le bon fonctionnement du système, et aussi de communications basées sur un réseau TETRA pour la sécurité, géré par l'autorité organisatrice des transports. Rennes Métropole fournissait sur une zone test la donnée de positionnement du bus.

Une genèse en matière d'ouverture des données qui a vu d'autres actions se mener en parallèle, notamment autour de Rennes Cité Vision et de promenades dans la Ville en 3D. En parallèle, les technologies RFID (« sans contact ») étaient aussi expérimentées en préfiguration de la future carte KorriGo pour les utilisateurs des transports et ensuite pour bien d'autres services publics (bibliothèques, piscines...).

Le domaine des transports sous l'impulsion de Keolis sur Rennes Métropole, en qualité d'exploitant du réseau STAR, a permis d'impulser la démarche d'ouverture des données publiques. Le premier cas déterminant fut l'ouverture des données relatives aux vélos en libre accès dans la Ville de Rennes. Il s'agissait de laisser les acteurs économiques ou associatifs créer des applications utilisables sur *smartphones* pour « faciliter » l'accès à ces vélos qui rencontraient un succès mitigé sur Rennes contrairement à d'autres villes. L'impact fut quasi immédiat, grâce aussi à un accompagnement dans la démarche par les services de la Ville et Métropole de Rennes, et notamment l'ouverture d'un portail multi-partenaires (Ville, Métropole, opérateur de transport, associations...) qui libèrent des jeux de données. *L'open data* était lancé en 2010 !

### Importance du triptyque capteurs-réseaux-mobilité

À cette époque, pour faire adhérer un vaste public, le champ des transports était donc très pertinent pour lancer la démarche d'ouverture des données et l'élargir à d'autres domaines comme la culture, la vie quotidienne, etc. Le projet PUMDP en 2011-2012 (projet urbain de modélisation des données publiques) avec les services de planification urbaine, des transports et du numérique avait proposé à des usagers du vélo de cartographier leurs parcours. Une application dédiée très simple avait été développée. Celle-ci permettait de capter la trace GPS d'un parcours cycliste et de la remonter dans une base. Plus de 700 traces ont été récoltées grâce à une mobilisation massive de cyclistes volontaires, et après un travail d'analyse, les urbanistes ont pu disposer d'une matière nouvelle qui leur permettait de constater des améliorations sur les parcours cyclables et notamment sur la nécessité de développer des axes pour traverser la ville... ébauches des REV (routes express vélo) que l'on connaît aujourd'hui et qui ont révolutionné fondamentalement la politique cyclable sur la Métropole de Rennes. L'utilisateur est devenu un capteur grâce à son équipement (*smartphone*). Les grandes plateformes (*bigtech*) l'avaient déjà bien compris, et pour les territoires l'enjeu était d'ouvrir des alternatives locales pour disposer en pleine propriété de la donnée et des compétences associées.

En mars 2026, plus de 350 jeux de données sont ainsi en accès libre sur le portail *open data* de Rennes Métropole.

## DES TECHNOLOGIES EN EXPÉRIMENTATION POUR PASSER À L'ÉCHELLE

### Illustrations : l'énergie et la motivation environnementale, LoRa Fabian

L'autre secteur qui nécessite de la mesure et donc des données, c'est celui de l'énergie. Vers 2012, le compteur Linky n'est pas massivement déployé. Il faut donc trouver des alternatives pour récupérer l'information sur les consommations électriques. Les FabLabs sont déjà émergents et sur Rennes un collectif de "Makers" dépose en licence libre la marque LabFab pour fédérer des initiatives, les reconnaître, les soutenir et les partager. Le projet, parfois appelé "Open Data Energy", utilisait des *LowTech* (basses technologies) pour compter le clignotement de la *led* du compteur, ou le nombre de tours du volant sur les plus anciens modèles. La donnée recueillie était remontée *via* la box de l'occupant du logement. Cette procédure nécessitait une installation et un paramétrage qui était trop complexe pour envisager une massification de la démarche.

L'arrivée de la technologie LoRa ouvrait une possibilité intéressante pour récolter ces informations autour de la consommation d'électricité. Sur Rennes Métropole, grâce aux travaux menés par plusieurs laboratoires (Télécom Bretagne, IRISA, INRIA, Université), un démonstrateur LoRa FABIAN a pu être testé. Avec juste 2 ou 3 antennes, il était possible de récupérer des données sur des kilomètres carrés.

Parmi les déterminants qui font la réussite d'une telle coopération, il y a les compétences partagées, c'est-à-dire la circulation des connaissances *via* des "creative commons by design". En ce sens, l'usage de composants de référence comme la carte Arduino a été un facteur constructif, et il faut souligner l'engagement de membres du LabFab qui ont développé des MooC et particulièrement ceux de l'IMT<sup>1</sup>. Ceux-ci ont rencontré un très grand succès localement et bien au-delà.

### Les politiques publiques pour passer à l'échelle

Depuis très longtemps, la ville et Métropole de Rennes utilisent déjà des technologies de communication pour des cas bien ciblés, comme pour remonter l'information des parcmètres. Ceux-ci étaient chaînés entre eux par rue et par quartier et permettaient d'obtenir une valeur qui, croisée avec les moyennes statistiques, donnait un indice de fraude probable. Ainsi, il suffisait de déclencher de façon ciblée une intervention de contrôle pour optimiser la récolte.

Attention cependant... vers les années 2015, la mode de la *Smart City* a envahi les territoires. Le numérique avec toutes les valeurs économiques potentielles devenait un élément stratégique à maîtriser. Les territoires qui n'avaient pas cultivé cette compétence se retrouvaient démunis et contraints d'accepter de devenir les clients des sociétés commerciales.

Rennes bénéficie de ses 40 ans du « Vivre en intelligence », mais la tentation est là. Les opportunités se multiplient pour essayer de privilégier la communication à l'action.

L'expérimentation par « essais, erreurs » fait partie de l'apprentissage avant de passer à l'échelle. Le prototypage (à petite échelle) est une étape qui part souvent d'un besoin

---

<sup>1</sup> Fabriquer un objet connecté (FUN), <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/fabriquer-un-objet-connecte/>

exprimé. Sur la commune de Saint-Sulpice-la-Forêt (1 500 habitants), les bâtiments communaux montraient des signes de vieillissement : fuite d'eau, perte énergétique... La nouvelle équipe municipale, sur le mandat 2014-2020, a pris le pari de s'équiper de capteurs (LoRa) et d'un système de visualisation des données.

Les acteurs locaux ne manquaient pas de compétences en la matière (Wi6Labs, Sensing Vision...).

La quantité d'eau et d'énergie économisée a pu être quantifiée et rendue visible pour un plus large public afin d'accompagner le changement de pratique et ainsi s'engager dans une boucle vertueuse qui associe les pouvoirs publics, les acteurs économiques et les citoyens.

Ce démonstrateur communal ouvrait la voie pour un passage à l'échelle de la Métropole de Rennes.

## QUESTIONS CLÉS AU NIVEAU TÉLÉCOM

### Difficultés de gestion des multiples technologies mobilisées

La collectivité rennaise a d'abord commencé par concevoir, mettre en œuvre et exploiter ses réseaux de fibre optique. Ensuite, les technologies radio TETRA ont été nécessaires pour répondre aux normes associées à l'autorité organisatrice des transports en commun (sécurité, continuité de service, géolocalisation des bus, etc.). Une douzaine d'antennes permettent de couvrir le territoire et ainsi de connecter les 400 bus qui circulent sur la Métropole. Les fonctionnalités relatives à la sécurité sont indispensables : adresser un message à l'ensemble des bus, communication bus-bus, etc. Il va maintenant falloir trouver une alternative avant la fermeture de la technologie TETRA annoncée pour 2030. La 5G privée pourrait en être la solution (chiffrement et authentification de bout en bout).

Pour collecter de nouvelles données, il a fallu déployer un réseau d'objets connectés. La technologie LoRa Wan a été retenue par Rennes Métropole et par plusieurs communes. Aujourd'hui, plus de 70 antennes sont déployées et des dizaines de milliers d'objets sont raccordés en lien avec les nombreux métiers de la collectivité. Les IoT pourraient se généraliser en substitution des réseaux mobiles 2G-3G encore utilisés pour remonter des données précieuses (exemple : postes d'assainissement).

### Les savoir-faire (recherche, entreprises, associations, citoyens, politiques...)

Caractérisé par son soutien à la recherche, le territoire de Rennes Métropole essaie d'encourager le transfert vers les entreprises. Une approche collaborative est indispensable pour accélérer le développement et le déploiement de l'innovation technologique et répondre aux enjeux de marché des filières. La collectivité cherche l'implication des associations et des citoyens.

L'enjeu est plus social que technologique. En 2005, « Tout Rennes blogue » met en ligne 43 *blogs* de quartiers, alimentés en photos et commentaires par les habitants grâce à des téléphones 3G laissés à leur disposition. Accompagnée par des sociologues, la Ville de Rennes a pu confirmer que le format *blog* pouvait être utilisé pour parler de sa ville plutôt que de soi<sup>2</sup>, et ainsi coproduire des communs.

---

<sup>2</sup> Rennes, laboratoire numérique (Espace des sciences), <https://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/264/dossier/rennes-laboratoire-numerique>

La participation citoyenne rend possible de nouveaux modèles. Pour cela, des chocs de cultures sont nécessaires. Par exemple, les données sur la qualité de l'air sont produites officiellement en Bretagne par AirBreizh, qui dispose de capteurs de très grande qualité, très onéreux et de fait en nombre limité. À l'inverse, des collectifs associatifs proposent des ateliers pour construire des « capteurs citoyens » peu coûteux et *LowTech* (avec un ESP et une connexion *wifi*). Ces ateliers rencontrent un succès populaire car ils offrent la possibilité à un large public de devenir acteur de la mesure. Plus d'une centaine de « capteurs citoyens » ont ainsi été installés en Bretagne grâce notamment à l'impulsion du LabFab, et les données sont ouvertes, ce qui apporte, par effet combinatoire, une meilleure précision géographique que le modèle descendant. Il serait bien évidemment très pertinent de mailler les deux modèles ! Ceci est une invitation à coopérer entre des modèles historiques et participatifs qu'Internet nous apporte.

## LA CONVERGENCE AVEC LA 5G ?

L'arrivée de la 5G a suscité des tensions en 2020 avec l'attribution de certaines bandes de fréquences spécifiques. La Ville de Rennes a alors dû organiser un débat avec différentes parties prenantes allant des collectifs engagés contre la prolifération des ondes jusqu'aux opérateurs. Il fallait sortir du bas débat binaire : pour ou contre la 5G ? Environ 1 500 citoyens ont été tirés au sort pour y participer, d'abord se former sur les enjeux pour ensuite, au début 2021, formuler des propositions<sup>3</sup> présentées au conseil municipal.

Des parcours de sensibilisation aux champs électromagnétiques dans la Ville, appelés Ambassad'Ondes ont ainsi été mis en œuvre<sup>4</sup>. Ceux-ci font découvrir aux participants de façon ludique le fonctionnement des réseaux mobiles et des ondes électromagnétiques sur la Ville de Rennes.

Un Conseil Citoyens du Numérique et un Guichet de la Téléphonie Mobile ont été ouverts. Une cartographie des points d'émission structure les processus avec les parties prenantes, par exemple pour accompagner les phases de conception, construction et mise en service des sites avec les opérateurs et leurs gestionnaires d'infrastructures. Environ 120 mesures de champs sont faites par an sur la Ville de Rennes, notamment dans les écoles.

Il en ressort une analyse qui montre que l'architecture des réseaux mobiles privilégie encore la couverture plutôt qu'un maillage rapproché pourtant permis aujourd'hui avec la 5G et qui permettrait une densification raisonnée pouvant répondre aux besoins actuels.

De ce fait, les opérateurs vont devoir multiplier les sites et pour y parvenir une coopération avec les collectivités locales est nécessaire. Pour autant, les fonctionnalités nouvelles vantées par la 5G (temps de latence, densité d'utilisateurs par cellule, IoT, priorisation de flux, sécurisation accentuée...) ne sont pas encore justifiées pour les usages communs. « Une bonne 4G pourrait encore très bien faire l'affaire ! ».

Des usages se profilent : pour les collectivités et autres autorités, la fin des réseaux TETRA nécessitera une nouvelle solution technologique et la 5G peut répondre aux enjeux de sécurité. Une infrastructure dédiée, neutre et partagée entre les acteurs publics serait la bienvenue. Dans cette optique, une réflexion globale permet de partir des usages potentiels des 300 métiers présents dans les collectivités pour répondre aux services publics.

---

<sup>3</sup> Mission d'étude 5G de la Ville de Rennes (La Fabrique citoyenne), <https://fabriquecitoyenne.fr/project/mission-detude-5g/presentation/presentation>

<sup>4</sup> Ambassad'Ondes (Wiki Rennes Métropole), <https://www.wiki-rennes.fr/Ambassad%27ondes>

Les espaces accueillant massivement du public, comme les centres de congrès, les stades, les bâtiments administratifs, doivent penser à s'équiper d'infrastructures dédiées. Une étude fine est alors nécessaire pour conjuguer les cellules radio et aussi les opérateurs. Le modèle du BTS Hôtel qui accueille en toute neutralité les 4 opérateurs<sup>5</sup>, a été mis en œuvre au Roazhon Park, Stade de Football de Rennes. Il permet la mutualisation des antennes et donc une réduction de l'empreinte environnementale. Des micro-cellules positionnées stratégiquement assurent une densité de connexions pour répondre aux pratiques de spectateurs et pour assurer un canal de communication en cas de crise. En dehors des matchs, les antennes ne s'activent pas ou très peu.

Ce modèle avait été testé et mis en œuvre dans le métro de Rennes avec des antennes dans chaque station et si nécessaire un répéteur. La continuité du signal a pu être assurée tout en limitant la puissance (principe ALARA<sup>6</sup>).

En mars 2026, avec Orange, un bus connecté 5G autonome est testé dans le centre de Rennes. L'histoire nous dira si l'avenir du bus et plus généralement de la mobilité est sans chauffeur...

## CONCLUSION

La 5G est arrivée après plusieurs années de co-construction de la ville connectée/intelligente basée sur différentes technologies. La technologie est prête, cependant, pour les collectivités locales, quelques ingrédients sont essentiels pour en tirer parti :

- culture de l'expérimentation en co-construction avec les habitants ;
- gestion des données et ouverture de certains jeux pour améliorer les services sur le territoire ;
- prise de décision et éventuellement un passage à l'échelle dans les différentes politiques publiques : mobilité, environnement, etc.

Enfin, les collectivités qui incarnent la proximité pourraient ouvrir une perspective intéressante pour nous permettre de réapprendre à concevoir, construire et mettre en œuvre des réseaux de télécommunications avec des industriels localisés en Europe... bref... retrouver notre indépendance !

---

<sup>5</sup> <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/entreprises/fiches-pratiques/amelioration-couverture-mobile-interieur-batiments-professionnels.html>

<sup>6</sup> As low as reasonably practicable (Wikipédia), [https://en.wikipedia.org/wiki/As\\_low\\_as\\_reasonably\\_practicable](https://en.wikipedia.org/wiki/As_low_as_reasonably_practicable)

# La 5G comme cinquième fluide hospitalier : quand le réseau mobile devient un outil de soins

Par Sylvie CASSAUBA-TIRCAZOT et François DALLAY  
Projet européen 5mart Ho5pital

De l'interdiction réglementaire de 1995 à l'infrastructure de soins de demain, la téléphonie mobile à l'hôpital a connu un revirement complet. Plusieurs études successives ont dissipé les craintes initiales et consacré le *smartphone* comme outil clinique à part entière. Face à la multiplication des équipements communicants et aux insuffisances de couverture radio intérieure, les établissements optent pour des DAS de nouvelle génération.

Couplés à une architecture 5G Standalone, ces dispositifs ouvrent l'accès au découpage réseau, au traitement local des données et à une géolocalisation métrique – autant de capacités que le *wifi* ne peut offrir seul. Le projet 5mart Ho5pital, lauréat du programme CEF Digital et déployé au CHU de Bordeaux avec Bouygues Telecom et Ericsson, en constitue le laboratoire grandeur nature. La 5G SA ne saurait se réduire à une évolution de la 4G : elle représente une rupture de paradigme pour l'hôpital numérique.

À l'hôpital, chaque seconde compte. La fiabilité des communications peut faire la différence entre la vie et la mort, et c'est pour répondre à cet impératif que des établissements hospitaliers déploient des infrastructures de radiocommunications internes. Parmi ces dispositifs, les DAS (Distributed Antenna Systems, soit systèmes d'antennes distribuées) et leurs déclinaisons 5G occupent une place centrale dans les stratégies de connectivité hospitalière.

## UN RETOURNEMENT DE SITUATION EN TRENTE ANS

L'histoire de la téléphonie mobile à l'hôpital est celle d'un revirement complet. La circulaire DH/EM1 n°40 du 9 octobre 1995 en recommandait l'interdiction pure et simple dans les établissements hospitaliers, au nom du principe de précaution. Une position prudente, cohérente avec les connaissances fragmentaires disponibles à l'époque.

L'accumulation progressive des données expérimentales et épidémiologiques a conduit, au fil des années 2000, à un assouplissement progressif de ces restrictions, puis à leur abandon de fait au début des années 2010. Le *smartphone* s'imposait alors comme outil de travail incontournable pour les professionnels de santé. Sur le plan de la sécurité des rayonnements, une méta-analyse récente (Karipidis *et al.*, 2024) portant sur soixante-trois études épidémiologiques n'a pas mis en évidence d'association significative entre l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences des réseaux 4G et 5G et l'incidence de tumeurs cérébrales. Ces conclusions corroborent les normes d'exposition définies par l'ICNIRP (2020) et soutiennent la conclusion d'une compatibilité des réseaux mobiles de nouvelle génération avec l'environnement hospitalier, sous réserve du respect du décret n°2002-775 du 3 mai 2002 relatif aux valeurs limites d'exposition du public

aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques<sup>1</sup>.

Deux points de vigilance demeurent néanmoins incontournables : la limitation de l'exposition aux rayonnements électromagnétiques dans le respect des valeurs limites réglementaires, et l'incidence éventuelle des émissions radiofréquences sur le fonctionnement des équipements médico-techniques (norme NF EN 60601-1-2).

### DES BESOINS CROISSANTS, UNE COUVERTURE INSUFFISANTE

Le raccourcissement des durées de séjour, l'essor de l'ambulatoire et l'intensification de la coordination entre professionnels de santé ont accru les besoins en communications mobiles, satisfaits dans un premier temps par les systèmes DECT conventionnels. Depuis plusieurs années, l'hybridation du système d'information hospitalier qui s'ouvre aux architectures *web*, aux plateformes SaaS et aux environnements *cloud*, génère des exigences nouvelles et nécessite le recours à de nouveaux dispositifs mobiles, plus polyvalents et connectés.



Figure 1 : Vitaly Gariev (Source : Unsplash.com).

La couverture radio à l'intérieur des bâtiments ne relève pas des obligations réglementaires imposées aux opérateurs mobiles, dont la responsabilité se limite à la couverture en espace extérieur. Les bâtiments hospitaliers, caractérisés par des architectures complexes, des sous-sols étendus, des zones blindées et l'usage de matériaux à haute densité conformes aux normes HQE, constituent des environnements particulièrement défavorables à la propagation des signaux radiofréquences. Un arrêté ministériel de juin 2024, pris dans le cadre du déploiement du Réseau Radio du Futur (RRF), impose désormais aux responsables des établissements recevant du public de premier groupe l'obligation d'assurer la couverture des terminaux des services de secours dans l'ensemble de leurs infrastructures.

---

<sup>1</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000226401>

À ces contraintes structurelles s'ajoute l'émergence de l'*Internet of Medical Things* (IoMT) : un hôpital de taille moyenne connecte déjà plusieurs milliers d'objets communicants. Longtemps considéré comme le réseau de référence, le *wifi* a été probablement surexploité et ne peut, seul, satisfaire les besoins de mobilité croissants. Les DAS, par leur conception dédiée à la mobilité et leur gestion avancée des ressources spectrales, apparaissent comme le chaînon manquant entre les réseaux filaires performants et une mobilité sans contrainte.

## DE L'ANTENNE PASSIVE AU DAS ACTIF 5G

Les établissements de santé ont longtemps structuré leur réseau mobile selon une logique de silos : *wifi* pour les usages bureautiques, DECT pour la téléphonie soignante, BLE ou RFID pour la traçabilité, câblage dédié pour les équipements biomédicaux critiques. Cette approche segmentée atteint ses limites à l'heure de la numérisation massive des données de santé.

Dans les réflexions françaises autour du bâtiment intelligent, la connectivité est désormais décrite comme le « cinquième fluide » du bâtiment hospitalier, au même titre que l'eau, le gaz, l'électricité et le câblage voix-données-images (VDI). Cette métaphore, portée par la Smart Building Alliance dans son référentiel R2S 4 Care adapté au *smart hospital*, place le transport de l'information au rang de première infrastructure technique fondatrice de l'hôpital intelligent. C'est précisément dans cette logique que s'inscrit la mise en œuvre d'un DAS 5G en contexte hospitalier : en déployant un réseau d'antennes distribuées à l'intérieur même des bâtiments, il fait de la couverture mobile 5G un fluide natif de l'architecture, irriguant uniformément chaque niveau, chaque couloir et chaque bloc, y compris dans les zones les plus opaques aux ondes extérieures, que ce soit du fait des matériaux HQE ou de la profondeur des sous-sols. Là où le système de câblage VDI constituait jusqu'ici le quatrième fluide du câblage structuré, le DAS 5G en représente l'évolution sans fil : il s'affranchit du câblage point à point pour distribuer la connectivité mobile comme une ressource hautement disponible et partagée.

Les DAS passifs, fondés sur un câblage coaxial, ont constitué la première réponse aux zones de faible couverture intérieure. Leur limite principale réside dans leur faible évolutivité : passer d'une architecture mono-opérateur à une infrastructure multi-opérateur, ou intégrer de nouvelles fonctionnalités liées aux générations successives de réseaux mobiles, implique des évolutions structurelles significatives. C'est pour répondre à ces limites que les DAS actifs ont progressivement émergé.

Un DAS actif distribue le signal radiofréquence depuis une source centralisée vers un réseau d'antennes déportées, en convertissant le signal RF en signal numérique transporté *via* fibre optique ou câble RJ45. Cette architecture garantit une couverture homogène dans l'ensemble des espaces fonctionnels, y compris les sous-sols techniques, les blocs opératoires et les circulations verticales. Les DAS modernes intègrent des capacités de formation de faisceau (*beamforming*), concentrant l'énergie radio vers les zones à forte densité d'utilisateurs, et peuvent accueillir simultanément plusieurs opérateurs sur une même infrastructure. Dans la pratique, des petits boîtiers discrets, les Radio Dots d'Ericsson par exemple, s'installent dans les zones à couvrir et sont reliés à une unité centrale par câble RJ45 ou fibre optique. Ils permettent d'optimiser la couverture radio en éliminant les zones d'ombre et offrent une latence quasi nulle, qualité essentielle lorsqu'il s'agit de supporter les cas d'usage les plus exigeants, comme la transmission instantanée d'imageries 3D au bloc opératoire.

Il convient de distinguer le DAS du simple répéteur : là où ce dernier réamplifie le signal capté en extérieur en sollicitant la capacité de la cellule radio *outdoor* et expose son exploitant à un encadrement réglementaire strict de l'ARCEP, le DAS constitue un site radio à part entière, raccordé par liaison dédiée au cœur de réseau de l'opérateur. Le

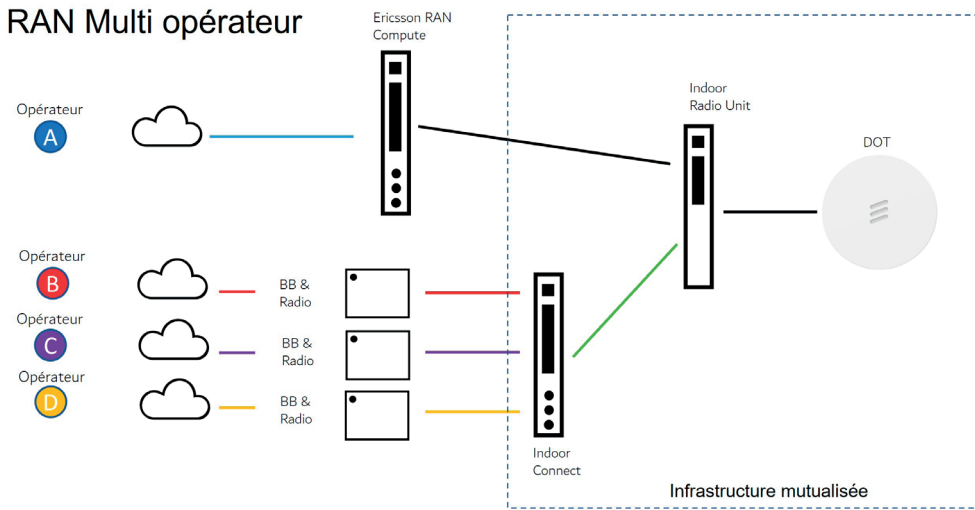


Figure 2 : Architecture multi-opérateur – quatre opérateurs partageant l'infrastructure Radio Dots mutualisée (*Indoor Connect*) (Source : Ericsson France).

trafic *indoor* y est écoulé de manière autonome, sans dégrader les performances de la cellule extérieure, et sur une infrastructure nativement multi-opérateurs, conforme aux obligations de raccordement issues de l'attribution des fréquences 5G.

## LA 5G STANDALONE : UNE RUPTURE DE PARADIGME

La 5G industrielle, qui conceptualise la déclinaison de dispositifs 5G adaptés aux secteurs à fortes contraintes opérationnelles, transpose au milieu hospitalier les exigences de fiabilité, de faible latence et de séparation des flux qui caractérisent les environnements de production critique : là où l'usine connectée exige une communication déterministe entre robots et automates, l'activité hospitalière requiert une connectivité garantie entre équipements biomédicaux mobiles, systèmes d'imagerie interventionnelle et flux de coordination clinique, par exemple. Ce paradigme repose sur un réseau privé ou hybride, déployé physiquement dans l'enceinte de l'établissement *via* un DAS 5G, qui offre des ressources radio réservées, des niveaux de service différenciés par *network slicing*, et un traitement local des données grâce à des équipements *edge* hébergés sur site, répondant ainsi aux impératifs de confidentialité des données de santé et de continuité de service. Dans ce cadre, le campus hospitalo-universitaire est traité comme un site industriel de soins : un périmètre maîtrisé, à couvrir de manière homogène et redondante, où la connectivité mobile n'est plus un service de confort mais une infrastructure critique au même titre que l'alimentation électrique ou les fluides médicaux.

L'architecture DAS hybride – dite Réseau Mobile Hybride (RMH) – représente l'évolution logique vers la 5G en milieu hospitalier. Elle concilie, sur une même infrastructure radio physique, un réseau public offrant couverture et continuité de service aux usagers de l'hôpital et une composante privée prenant la forme d'un réseau non public intégré au réseau public (modèle PNI-NPN défini dans la Release 16 de la 3GPP). Cette architecture se distingue fondamentalement des premiers réseaux 5G en mode Non-Standalone (NSA), qui maintenaient une dépendance au cœur de réseau 4G.

La 5G Standalone (SA) libère le plein potentiel de la norme. Son cœur de réseau natif ouvre l'accès au découpage réseau (*network slicing*), soit la création de tranches logiques

dotées de garanties contractuelles de débit, de latence et de disponibilité pour chaque catégorie d'application. Il permet aussi le Multi-access Edge Computing (MEC), qui déporte les capacités de traitement au plus près de l'antenne, réduisant la latence applicative à quelques millisecondes. Une fonction UPF (User Plane Function) déployée localement garantit enfin que les flux de données sensibles ne quittent pas l'enceinte de l'établissement, répondant aux exigences du RGPD et du référentiel HDS.

## LE PROJET 5MART HOSPITAL : UN LABORATOIRE GRANDEUR NATURE AU CHU DE BORDEAUX

C'est dans cette dynamique que s'inscrit le projet 5mart Ho5pital, lauréat du quatrième appel du programme CEF Digital 5G for Smart Communities de la Commission européenne. Coordonné par Bouygues Telecom Business en partenariat avec le CHU de Bordeaux, il vise à couvrir en 5G dix-huit bâtiments du CHU à partir du second semestre 2026, en s'appuyant sur la solution de Réseau Mobile Hybride 5G de Bouygues Telecom Business (RMH5G). Cette solution est composée d'un DAS hybride actif utilisant des Radio Dots Ericsson reliés au cœur 5G SA de Bouygues Telecom, complété par des passerelles locales (Local Packet Gateways) géo-redondées. Concrètement, la solution déployée utilise plusieurs des bandes de fréquence de Bouygues Telecom et les capacités de *network slicing* de son réseau 5G SA pour privatiser une partie de celui-ci au profit du CHU de Bordeaux. Cette solution permet d'utiliser la même infrastructure pour offrir à la fois des connexions publiques pour les patients et le personnel de santé, ainsi que des connexions privées pour les usages propres à l'hôpital. La plateforme Ericsson Network Location (ENL) assurera une géolocalisation en environnement intérieur grâce au système DOT, et en extérieur *via* la couverture 5G SA.

Conçue et opérée en dehors du système d'information hospitalier par Bouygues Telecom, la solution Réseau Mobile Hybride 5G présente une caractéristique structurelle rare : elle est étanche aux compromissions internes et échappe à la progression latérale des cyberattaques de type ransomware, vecteur le plus fréquent dans le secteur sanitaire. Cette non-congruence architecturale, souvent perçue comme une contrainte d'intégration,

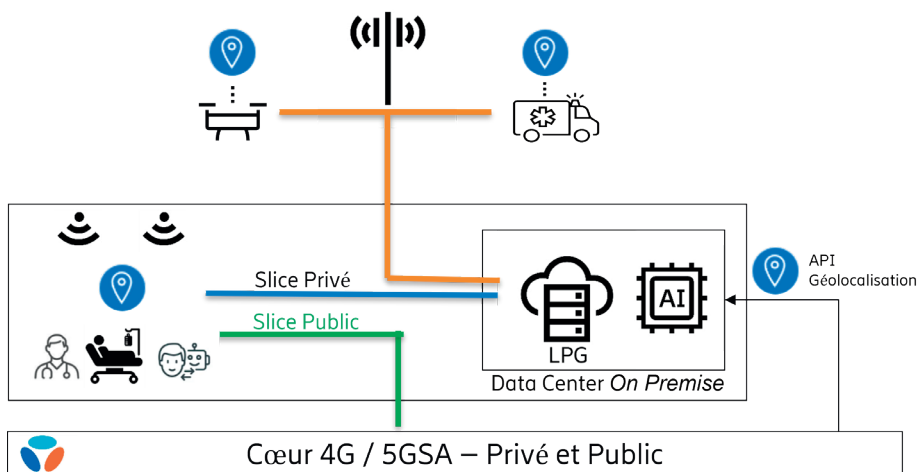


Figure 3 : Architecture 5G SA du projet Bordeaux 5mart Ho5pital – découpage en tranches privée et publique avec passerelle locale (LPG) et cœur 4G/5G SA (Source : Bouygues Telecom / CHU de Bordeaux / Ericsson).

devient un avantage défensif : en cas d'effondrement partiel ou total du réseau IP hospitalier, le DAS 5G continue d'assurer la communication voix et *data* des professionnels de santé, constituant un réseau de repli souverain pour les cellules de crise et les protocoles de continuité d'activité.

Dès 2027, une dizaine de cas d'usage seront déployés autour de quatre thématiques afin d'améliorer l'expérience des patients et soignants ; la qualité des soins ; la sûreté et sécurité ; la performance et la formation. Parmi les premiers déploiements figurent les ambulances connectées, conçues pour faciliter la prise en charge médicale dès l'étape préhospitalière, la modélisation 3D en chirurgie pour préparer les interventions ou à des fins d'enseignement et les lunettes connectées pour la prise en charge collégiale de pathologies complexes ou l'entraide entre professionnels.

Le projet 5mart Ho5pital fait suite à plusieurs programmes européens qui en ont validé la faisabilité : le projet 5G4UH à Francfort (Vodafone Germany), le réseau 5G SA privé de l'hôpital universitaire d'Oulu (Finlande) et le projet 5G-TRACE en Grèce.

## DES CAS D'USAGE QUI TRANSFORMENT LES SOINS

L'analyse comparative des déploiements 5G hospitaliers à l'échelle mondiale fait ressortir quelques axes de développements. Le *monitoring* patient en continu et l'IoMT constituent les cas d'usage à la fois les plus fréquemment documentés et les plus pertinents cliniquement : ils exploitent le mode mMTC (massive Machine Type Communications) de la 5G SA, permettant des connexions de l'ordre du million par km<sup>2</sup> avec des garanties de latence pour les alertes critiques.

La télémédecine avancée et l'assistance en réalité augmentée constituent les domaines d'élaboration de cas d'usage les plus cités dans la littérature internationale. À Singapour, le National University Health System a planifié et suivi plus de trente interventions chirurgicales complexes grâce à des rendus volumiques 3D superposés au patient en bloc opératoire (résultats présentés à HIMSS APAC 2024). Le suivi des actifs critiques (RTLs, Real-Time Location System) est quant à lui fréquemment déployé dès la mise en service d'un réseau privé, car le retour sur investissement escompté est rapide : la réduction du temps de recherche d'équipements biomédicaux est estimée à 20-40 %. L'ambulance connectée constitue enfin le seul cas d'usage requérant une couverture mobile continue hors campus : des routeurs 5G assurent la transmission en temps réel des constantes vitales du patient à destination de l'équipe médicale des urgences, *via* un *network slice* dédié.

En France, les opérateurs accompagnent cette transformation : Orange a ainsi équipé des établissements pionniers comme le CHU de Lille dès 2019 et développe des cas d'usage innovants, par exemple des véhicules à guidage automatique pour l'approvisionnement en médicaments ou le suivi temps réel des actifs médicaux mobiles.

En dépassant le strict périmètre de la couverture téléphonique, le Réseau Mobile Hybride peut devenir un catalyseur de convergence organisationnelle au sein de l'hôpital, un effet structurant dont la portée dépasse largement les objectifs initiaux du déploiement. Sa mise en œuvre crée en effet une opportunité rare de concertation entre des directions aux expertises complémentaires : la DSI, qui apporte sa maîtrise de la sécurité et de l'interopérabilité des systèmes ; la direction biomédicale, forte de sa connaissance des équipements connectés et de leurs contraintes réglementaires spécifiques ; la direction des travaux, garante de la faisabilité d'intégration dans le bâti existant ou en construction ; et le personnel soignant, détenteur irremplaçable de la connaissance des usages réels au lit du patient. Le réseau mobile *indoor* institue ainsi une dynamique de co-construction inédite, où chaque métier enrichit le projet de son expérience et découvre la valeur des contraintes des autres. Mais le Réseau Mobile Hybride 5G offre également à chaque corps

## 5G Advanced Location Services seamless outdoor -indoor location

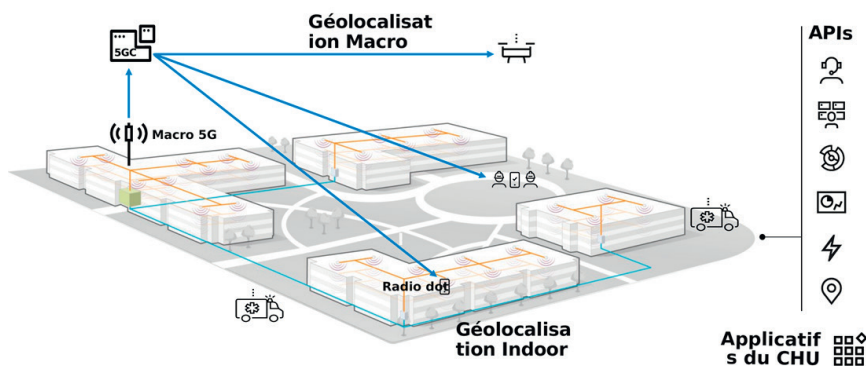


Figure 4 : Services de géolocalisation avancés 5G – couverture continue *outdoor-indoor* via antenne macro 5G et Radio Dots (géolocalisation métrique en intérieur) (Source : Ericsson).

de métier un socle d'innovation autonome : sur une même infrastructure partagée, les équipes biomédicales peuvent développer la géolocalisation des dispositifs médicaux, la DSI déployer des outils de télémaintenance sécurisés, et les soignants expérimenter la télésurveillance mobile. En cela, le Réseau Mobile Hybride 5G fonctionne comme un véritable bien commun numérique, une infrastructure dont la valeur s'accroît à mesure que les usages se multiplient, sans que nul n'en détienne l'exclusivité.

## LES PROCHAINES ÉTAPES : REDCAP, L4S ET 5G ADVANCED

Les mises à jour logicielles issues des travaux de normalisation 3GPP permettront d'intégrer les futures avancées de la 5G aux DAS actifs sans que soient nécessaires de lourds travaux d'infrastructure. Parmi les évolutions les plus prometteuses, la technologie RedCap (Reduced Capability, ou NR-Light) répond à un impératif économique et pratique : rendre accessibles les avantages de la 5G à une large gamme de dispositifs IoT médicaux, sans la complexité et le coût d'un *chipset* 5G complet. En limitant la largeur de bande à 20 MHz et en réduisant le nombre d'antennes MIMO, RedCap divise par deux à trois la consommation énergétique et le coût du module radio, ce qui allonge notablement la durée de vie des batteries des capteurs portables.

L'architecture L4S (Low Latency, Low Loss, Scalable Throughput), standardisée par l'IETF, représente une autre avancée significative. Là où les mécanismes TCP classiques induisent une accumulation de tampons pouvant porter la latence à plusieurs centaines de millisecondes sous charge, L4S maintient une latence quasi nulle quelle que soit la charge du réseau. Les flux de téléconsultation et de téléchirurgie bénéficient ainsi d'une qualité d'image prévisible et constante, sans artefacts de compression ni saccades.

L'évolution vers la 5G Advanced ouvre des perspectives complémentaires : provisionnement dynamique des *slices*, supervision en continu des performances, intégration de capteurs biomédicaux sans batterie via l'Ambient IoT. L'immense volume de données fiables collectées en temps réel constitue le carburant de l'intelligence artificielle médicale, avec des cas d'utilisation prospectifs prometteurs, tels que la détection précoce du sepsis, des modèles prédictifs de dégradation clinique ou l'analyse automatisée de flux opératoires. Le MEC local permet d'exécuter ces algorithmes avec une latence inférieure à la

dizaine de millisecondes, sans que les données de santé ne transitent vers un *datacenter* externe.

La 5G SA ne doit donc pas être appréhendée comme une simple évolution de la 4G, mais comme une plateforme de services entièrement repensée. Sa maîtrise exige une synergie étroite entre experts télécoms, ingénieurs biomédicaux, équipes cliniques et juristes spécialisés en droit de la santé numérique. C'est à cette condition que ses promesses se traduiront en bénéfices durables pour les patients et les soignants.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

KARIPIDIS K., BAAKEN D., LONEY T. *et al.* (2024), “The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies – Part I: Most researched outcomes”, *Environment International*, Vol. 191, 108983, doi:10.1016/j.envint.2024.108983

ICNIRP (2020), “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)”, *Health Physics*, 118(5), pp. 483-524.

COMMISSION EUROPÉENNE / HaDEA (2023), “CEF Digital 5G for Smart Communities – Selected Projects”, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, [https://hadea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/cef-digital\\_fr](https://hadea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/cef-digital_fr)

BOUYGUES TELECOM BUSINESS (2026), « 5mart Ho5pital – Présentation du projet CEF Digital 4<sup>e</sup> vague, CHU de Bordeaux / Bouygues Telecom / Ericsson », [document interne, non publié, disponible auprès des auteurs].

IMDA/ NUHS (2024), “5G Use cases at the National University Health System Singapore”, présentation HIMSS APAC 2024, Singapour, GSMA Foundry / Ericsson [source non académique, disponible auprès des auteurs].

NETMANIAS (2024), “31 Private 5G Network Cases in Korea's Healthcare Sector”, rapport d'étude, Séoul, [www.netmanias.com](http://www.netmanias.com) [source grise, non soumise à revue par les pairs].

ERICSSON (2023), “Ericsson rides next wave of 5G with new RedCap solution”, communiqué de presse, juin 2023, <https://www.ericsson.com/en/news/2023/6/ericsson-rides-next-wave-of-5g-with-new-redcap-solution>

ERICSSON (2021), “Enabling time-critical applications over 5G with rate adaptation”, White Paper, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers>

DÉCRET n°2002-775 du 3 mai 2002 relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques, *Journal officiel de la République française*, 5 mai 2002, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000775781>

# 5G industrielle et IA : des complémentarités à exploiter

Par Pierre-Jean BENGHOZI

Directeur de recherche émérite au CNRS et à l'École polytechnique

La 5G peine à démontrer sa rentabilité lorsqu'elle est envisagée comme simple évolution de la connectivité mobile. Cet article montre que son véritable modèle économique émerge à travers son couplage avec l'intelligence artificielle opérationnelle. En tant qu'infrastructure distribuée, la 5G révèle tout son potentiel dans des environnements industriels exigeant une faible latence, une fiabilité élevée et un traitement en temps réel des données.

L'IA agit ainsi comme technologie complémentaire et activatrice, permettant de valoriser des usages critiques (industrie, santé, énergie) et de basculer vers des modèles économiques B2B fondés sur la performance. Cette convergence reconfigure la chaîne de valeur numérique autour du triptyque réseau-*edge computing*-IA, et repositionne les opérateurs télécoms comme acteurs stratégiques des infrastructures critiques, au cœur des enjeux de souveraineté industrielle.

## INTRODUCTION – UNE PROMESSE TECHNOLOGIQUE EN QUÊTE DE MODÈLE

La 5G a été présentée comme une révolution. Débits démultipliés, latence quasi nulle, objets connectés en masse, industrie 4.0, télémédecine, véhicules autonomes : les promesses étaient nombreuses. Pourtant, plusieurs années après, les premiers déploiements de la 5G ont surtout permis de renforcer les réseaux 4G et les consommateurs ne perçoivent pas toujours de rupture suffisamment tangible pour justifier une hausse significative de leurs abonnements. Dans le même temps, les investissements ont été considérables : achats des fréquences, équipements, densification des réseaux, virtualisation des architectures. Le modèle économique de la 5G apparaît ainsi sous tension. Faut-il en conclure pour autant que la 5G a été surévaluée ? Ou bien n'est-ce pas plutôt que son véritable terrain de rentabilité avait été mal identifié ?

La 5G ne devient en effet économiquement soutenable que lorsqu'elle cesse d'être perçue comme un produit de connectivité mais qu'elle est comprise comme une infrastructure distribuée. L'essor récent de l'intelligence artificielle – et en particulier d'une IA opérationnelle embarquée dans les processus industriels – en révèle la logique économique profonde. Plus précisément, la 5G devient même l'infrastructure critique d'un écosystème IA temps réel et l'IA crée les conditions économiques de rentabilité d'une 5G à orientation professionnelle.

## LA 5G COMME INFRASTRUCTURE DISTRIBUÉE : UNE AUTRE ÉQUATION ÉCONOMIQUE

Les technologies à usage général, notamment celles des infrastructures, ne créent pas immédiatement de valeur par elles-mêmes car leur impact dépend de la diffusion d'innova-

vations complémentaires. Qu'il s'agisse de l'électricité, du chemin de fer ou de l'Internet, la valeur économique des réseaux ne s'est pleinement révélée qu'avec les mutations qu'elles ont permis dans les organisations, les modèles industriels et les usages.

C'est bien le cas de la 5G qui couple la mise en œuvre de technologies disruptives (antennes actives, ondes millimétriques, *smart cells*) avec la possibilité d'innover, de manière progressive, sur des services applicatifs, à partir d'initiatives, d'acteurs et d'investissements effectués à plusieurs niveaux par différents secteurs. Ses caractéristiques techniques – faible latence, densité de connexion, découpage virtuel du réseau (*network slicing*), fiabilité accrue – ne prennent sens que quand des applications exigent ces propriétés émergent à grande échelle. Or, pendant plusieurs années, l'essentiel de la demande de connectivité mobile a été tirée par des usages relativement peu différenciés : *streaming* vidéo, *gaming*, réseaux sociaux. Ces usages appellent de meilleurs débits, mais ils ne requièrent pas nécessairement les capacités les plus avancées de la 5G. Le *wifi* amélioré ou la 4G optimisée suffisent alors souvent à répondre aux attentes.

Se sont ainsi dessinées plusieurs manières d'envisager la montée en puissance de la 5G, selon que l'on envisageait celle-ci comme simple prolongement de la 4G, comme support de réseaux privés locaux, comme partie intégrante des offres *business* des opérateurs, ou encore comme base de la numérisation des entreprises et des chaînes d'approvisionnement.

Les marchés « entreprise » et la numérisation de l'industrie s'avèrent finalement un enjeu tout aussi important pour l'économie que celui des individus, du marché de masse qu'ils constituent et qui est le plus souvent mis en avant. Une numérisation accrue des entreprises constitue un pilier essentiel de la croissance future. Pourtant, le retard des entreprises en matière de numérisation transparaît aujourd'hui autant dans la faible appropriation des technologies que dans le développement des usages.

Dès lors, les services de connectivité représentent la porte d'entrée des entreprises dans l'ère numérique : il existe par exemple une corrélation entre l'usage avancé de l'internet et l'équipement en fibre optique. Plus largement, le cas de la Suède, *leader* dans la numérisation des entreprises montre que cette position a reposé sur le dynamisme d'une offre télécom garantissant des services internet compétitifs pour les entreprises.

À l'inverse, malgré la force de sa couverture FttH, la France est marquée par un faible nombre de réseaux mobiles 5G privés dédiés, bien moins qu'en Allemagne. Cette technologie est directement corrélée avec la numérisation car elle permet l'échange de différents types de données ou d'information, la connexion de machines comme des robots, et contribue ainsi à apporter des gains de productivité et une meilleure fluidité des flux dans les usines.

## L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE COMME TECHNOLOGIE ACTIVATRICE

Une infrastructure ne crée ainsi de valeur que si des applications émergent, des écosystèmes se structurent et des modèles organisationnels s'adaptent. Or, il manquait à la 5G une technologie complémentaire capable de tirer pleinement parti de ses attributs distinctifs. La question est donc bien de savoir quelle technologie complémentaire serait aujourd'hui en mesure d'activer réellement le potentiel de la 5G.

Plusieurs arguments militent pour voir cette réponse dans l'IA, tant elle manifeste une complémentarité structurelle avec la 5G. Il ne s'agit pas uniquement des modèles conversationnels ou générateurs de contenus, mais d'IA embarquées dans les processus opérationnels. De telles applications créent un besoin massif de données en temps réel et appellent une fiabilité, une faible latence, une densité des objets connectés, des traitements *edge* et une sécurisation des environnements industriels. Ces exigences corres-

pondent précisément aux capacités différenciantes de la 5G, notamment dans le cadre d'architectures distribuées. Le développement de telles IA se heurte cependant aux difficultés plus générales de la numérisation des entreprises.

## LES ARBITRAGES STRATÉGIQUES POUR LES ENTREPRISES

Alors que le discours public sur l'IA se concentre le plus souvent sur la disruption et le remplacement du travail humain, son effet le plus tangible dans la plupart des entreprises réside dans l'amélioration incrémentale de la productivité.

Dans les faits, l'IA agit comme un levier de rationalisation d'accélération et d'optimisation des outils de gestion. L'une des premières sources de gains économiques réside dans l'automatisation intelligente des processus car les systèmes d'IA sont capables d'apprendre et d'adapter leurs décisions à la variabilité des situations. Au-delà des processus, l'IA agit ensuite comme un amplificateur des capacités décisionnelles. Dans des situations complexes, incertaines et saturées d'informations, l'IA permet de simuler des scénarios et d'éclairer des décisions complexes. Un troisième levier de productivité repose sur la fluidification des interactions organisationnelles. L'IA peut réduire les frictions internes et améliorer la coordination inter-fonctions. Enfin, l'IA devient un outil de productivité cognitive et créative, en accélérant les cycles d'innovation et la production de connaissances.

Les cas d'usage des couplages 5G / IA concernent, de ce fait, des champs très différents et s'observent dans presque tous les secteurs : la santé, la finance, le droit, l'industrie, la défense, l'énergie, la culture... Dans l'industrie, cela touche la vision industrielle en temps réel (pour la maintenance, par exemple), les robots mobiles autonomes et la maintenance prédictive augmentée par l'IA. En matière de logistique, il s'agit de la gestion dynamique des flux et des jumeaux numériques d'entrepôts. Dans la santé, le couplage se trouve dans la télémédecine haute résolution ainsi que dans la chirurgie assistée en temps réel. Enfin, en matière d'énergie ou de transport, c'est le cas des *smart grids* et du pilotage en temps réel de réseaux électriques.

Cette variété des cas d'usage fait écho à un essor important des IA verticales et sectorielles qui s'appuient sur la spécialisation des modèles et leur ajustement aux corpus et aux contraintes métiers, tout en s'inscrivant dans une logique d'interopérabilité et de personnalisation.

L'apparente polyvalence de l'IA masque donc une réalité stratégique et économique, en fait, très fragmentée. Derrière les grands modèles multimodaux, censés pouvoir tout faire, se déploie une économie de l'IA de plus en plus segmentée, contextuelle et orientée vers les usages. On assiste à une tension croissante entre deux dynamiques. D'un côté, il se manifeste une tendance à l'intégration, incarnée par les grands modèles généralistes (OpenAI, Anthropic, Google, Meta), qui cherchent à construire des plateformes globales d'intelligence artificielle, à même de répondre à tout type de besoin dans une logique B2C ou B2B élargie. De l'autre côté, on observe une tendance à la spécialisation, portée par des *startups*, des laboratoires ou des acteurs sectoriels (santé, finance, industrie, droit, énergie, culture, etc.), qui développent des modèles spécialisés, contextuels et intégrés à des chaînes de valeur spécifiques.

Cette IA opérationnelle (vision industrielle en temps réel, robotique autonome, maintenance prédictive, optimisation dynamique de flux logistiques, pilotage intelligent de réseaux énergétiques) exige des boucles décisionnelles très rapides, ce que permet la très faible latence de la 5G. Dans un environnement industriel, quelques millisecondes peuvent déterminer la sécurité ou la performance d'un système. La 5G permet ensuite de répondre aux besoins de collecte massive et continue de données à partir des flux générés au fil de l'eau par les divers capteurs, caméras et autres objets connectés. Les modèles

d'IA (*a fortiori* ceux des *world models*) nécessitent une massification des capteurs et objets connectés pour assurer une collecte continue de données et la sécurisation de leur orchestration. La 5G permet justement cette densification de l'IoT industriel grâce à des antennes MIMO permettant la connectivité massive de nombreux objets – des conteneurs en zone aéroportuaire, par exemple.

Enfin, les applications d'IA critiques (hôpitaux, énergie, logistique, défense) supposent une qualité de service garantie, ce que permet le *slicing*. Plus largement, les applications critiques ne tolèrent pas l'interruption. En termes de sécurité et de souveraineté, les entreprises ont besoin de conserver la maîtrise de leurs données sur site et de sécuriser les processus critiques en réduisant leurs dépendances aux *clouds* distants tout en préservant la confidentialité de leurs données stratégiques. La 5G privée couplée aux traitements distribués de l'*edge computing* offre une telle réponse stratégique.

Ce faisant, la 5G privée devient un outil essentiel d'autonomie industrielle car l'IA déplace la valeur vers l'infrastructure critique en favorisant les traitements locaux d'applications industrielles, sans dépendance aux réseaux filaires. L'IA ne se contente pas d'utiliser la 5G ; elle en révèle la nécessité économique.

La conséquence d'un tel constat est de pouvoir, grâce à l'IA, établir une monétisation premium de la 5G. En effet, les applications critiques demandent des niveaux de services élevés, des bandes passantes protégées, des contrats à long terme. On passe alors d'un modèle économique national de la 5G reposant sur le volume de connectivité s'appuyant sur le grand public à un modèle local s'appuyant sur une plus grande valeur industrielle.

## LA MUTATION DES MODÈLES ÉCONOMIQUES

La 5G privée, déployée sur un site industriel ou un campus, permet d'orchestrer les flux de données de manière sécurisée et segmentée. Elle devient une infrastructure critique interne à l'entreprise. Dans une usine, un port, un hôpital ou un réseau électrique, la décision ne peut pas toujours attendre un aller-retour vers un *cloud* distant. Les contraintes de latence, de résilience et de sécurité favorisent l'émergence d'une logique d'*edge computing*, où une partie du traitement est réalisée au plus près des capteurs et des machines.

Le destin de l'intelligence artificielle dépendra largement de la capacité des acteurs à transformer le couteau suisse des GenAI en une boîte à outils industriels maîtrisée, interopérable et gouvernée par des principes de confiance, d'efficacité et de responsabilité. L'IA doit donc être envisagée comme une nouvelle ressource fournissant des aides à l'organisation et à la productivité, et pas seulement sous l'angle de la disruption.

Ce déplacement est stratégique. Il reconfigure la chaîne de valeur numérique autour d'un triptyque composé de :

- l'infrastructure radio (5G) ;
- les capacités de calcul locales (*edge*) ;
- les applications et algorithmes d'IA spécialisés.

Traditionnellement, le modèle des opérateurs télécoms est surtout celui d'un modèle B2C grand public, reposant sur la massification des abonnements. La concurrence y est forte, les marges contraintes, et la différenciation limitée. La 5G, dans cette configuration, peine à générer un surcroît significatif de revenus.

Une véritable rupture réside toutefois dans la convergence entre opérateurs télécoms, fournisseurs de *cloud*, intégrateurs industriels et éditeurs d'IA. En effet, les telcos tendent à devenir opérateurs d'écosystèmes, fournisseurs de plateformes locales, partenaires d'automatisation. C'est une mutation structurelle du secteur.

Ainsi, la 5G privée industrielle s’inscrit dans une logique de contractualisation à plus long terme, d’intégration sur mesure et de co-investissement. Elle s’adresse à des secteurs où l’arrêt de production ou la défaillance d’un système a un coût élevé. Ce marché est en forte croissance et les cas d’usage y sont nombreux : usines intelligentes et robotique mobile, ports, aéroports et plateformes logistiques autonomes, exploitations minières connectées, hôpitaux et campus médicaux, réseaux énergétiques intelligents. Le modèle économique repose, dans ce cas, sur la facturation par site, les partenariats industriels et une logique de marché B2B. Dans ces environnements industriels, la disposition à payer repose sur une création de valeur opérationnelle directement visible : gains de productivité, réduction des incidents, optimisation énergétique.

Ces transformations ne bouleversent pas nécessairement la structure de l’entreprise, mais en reconfigurent profondément les modes d’efficacité interne et la création de valeur, en entraînant une mutation des modèles économiques qui peut s’opérer au niveau de l’entreprise utilisatrice, de l’ensemble de la filière, d’un écosystème national ou local. Parallèlement, l’appropriation et le partage de la valeur créée par l’IA et la 5G supposent de réussir à prendre en compte la répartition du financement des infrastructures, la nature des externalités de réseau (report des coûts sur certains acteurs ou effet de dominance des “winner-takes-all”), l’articulation entre l’économie de l’infrastructure, celle de la donnée et celle des entreprises utilisatrices.

Pendant la décennie précédente, la valeur créée par le numérique s’est largement concentrée dans les plateformes et les *hyperscalers*. Le modèle dominant reposait sur la centralisation et le traitement des données dans de vastes centres de calcul. L’IA opérationnelle modifie cette architecture. La connectivité n’est plus une commodité interchangeable ; elle s’intègre dans une architecture technologique cohérente. La valeur n’y provient plus de son seul couplage à la fourniture de services à valeur ajoutée, mais elle se déplace vers l’orchestration de l’ensemble en solutions intégrées combinant réseau, *edge computing*, cybersécurité, *slicing premium* et briques d’intelligence artificielle.

Cette évolution s’inscrit dans un contexte plus large de recomposition économique entre les différentes couches de cette chaîne de valeur, à savoir : fabricants de semi-conducteurs, équipementiers télécoms, *hyperscalers*, plateformes et éditeurs de solutions IA, intégrateurs industriels. Plus précisément, la question centrale devient celle du contrôle des couches d’orchestration et des données. Qui définit les standards ? Qui capte la valeur créée par l’automatisation intelligente ? Les opérateurs qui resteront cantonnés à la couche de connectivité risquent une marginalisation progressive. Ceux qui monteront dans la chaîne de valeur pourront redevenir des acteurs stratégiques des infrastructures critiques.

## CONCLUSION – DE LA CONNECTIVITÉ À L’INTELLIGENCE DISTRIBUÉE

Au regard d’une monétisation moindre qu’anticipée, il ne faudrait pas déduire que la 5G a échoué. Elle était en attente de son complément stratégique. En tant qu’infrastructure générique, elle nécessitait une technologie capable d’exploiter pleinement ses propriétés distinctives. L’essor de l’intelligence artificielle opérationnelle fournit cette impulsion.

La trajectoire de la 5G rappelle une leçon économique classique : une technologie et une infrastructure ne créent pas mécaniquement un marché ; elles offrent les conditions de possibilité d’un écosystème. L’IA joue aujourd’hui ce rôle d’activateur systémique. Elle contribue à faire passer la 5G d’une amélioration incrémentale de la connectivité en pilier d’une architecture d’intelligence distribuée.

Il ne s’agit plus de parler seulement des vitesses de téléchargement des *smartphones*, mais de la capacité d’un territoire ou d’une entreprise à piloter en temps réel des systèmes

complexes et automatisés. Du point de vue des managers, la question n'est pas théorique. Faut-il investir dans une 5G privée ou privilégier des solutions *wifi* avancées ? Faut-il internaliser des capacités d'*edge computing* ? Comment arbitrer entre *cloud* public et architectures hybrides ? Quelle gouvernance mettre en place pour les données industrielles ? Comment gérer la dépendance aux équipementiers et aux *hyperscalers* ?

La réponse dépend du niveau de criticité des opérations, de la maturité numérique de l'organisation et de la stratégie de long terme. Mais une constante s'impose : plus l'IA est intégrée aux processus du cœur de métier, plus l'infrastructure de connectivité devient stratégique. L'IA n'est donc pas seulement une nouvelle application, elle est aussi la condition de rentabilité des infrastructures numériques de nouvelle génération.

La 5G cesse alors d'être un produit commercial. Elle devient une ressource stratégique, au cœur de la transformation des systèmes productifs côté entreprises utilisatrices, mais aussi de l'évolution des frontières sectorielles entre télécom, *cloud* IA et industrie. La question centrale n'est donc plus de savoir si la 5G est rentable mais comment et par qui contrôler l'architecture de l'intelligence distribuée. Les décisions prises aujourd'hui – en matière d'investissement, de partenariats et de structuration d'écosystèmes – détermineront la place des acteurs industriels et des opérateurs dans la prochaine phase de l'économie numérique.

Le risque fondamental est dès lors que, si l'Europe ne structure pas ses champions télécoms, son *edge cloud* et ses capacités d'IA industrielles, elle risque de perdre le contrôle sur les infrastructures critiques. Pour les économies européennes en particulier, l'enjeu dépasse la rentabilité des opérateurs : il touche à la souveraineté industrielle et à la maîtrise de ces infrastructures critiques.

## RÉFÉRENCES

BENGHOZI P.-J. (2025), « Bulle de l'IA : décryptage d'un phénomène économique », *Polytechnique Insights*, Novembre.

BENGHOZI P.-J. (2022), « La 5G, plus qu'une simple génération de téléphonie ? », *Polytechnique Insights*, Mars.

BENGHOZI P.-J. (2024), « De la manufacture à l'infrastructure : des conséquences pour la régulation », *Enjeux numériques*, n°27, pp. 25-30.

BENGHOZI P.-J. (2019), « Ouverture, standardisation technique et régulation », *Enjeux numériques*, n°5, pp. 11-15.

BRYNJOLFSSON E. & MCELHERAN K. (2023), "The complementarity of AI and human capital: Evidence from firm-level data", *Management Science*, 69(4), pp. 1802-1820.

GAWER A. (2020), "Digital platforms' boundaries: The interplay of firm scope, platform governance, and ecosystem strategy", *Long Range Planning*, 53(4), pp. 1-15.

KAPLAN A. & HAENLEIN M. (2020), "Rulers of the world, unite! The challenges and opportunities of artificial intelligence", *Business Horizons*, 63(1), pp. 37-50.

CHARDON-BOUCAUD S., DOZIAS A. & GALLEZOT C. (2024), « La chaîne de valeur de l'intelligence artificielle : enjeux économiques et place de la France », *Trésor-Éco*, n°354, Décembre.

# On the road to 6G - Status of industry progress in a changed world

By Ulrich DROPMANN

Head of Standardization and Ecosystem Engagement for Nokia

The article describes the status of the global journey toward 6G in mid2026. Building on a 10year generational cycle, industry targets initial 6G commercialization from 2029 onwards. Standardization follows the established model between ITU and 3GPP: ITU defines IMT2030 requirements, while 3GPP develops the technical specifications, with key decisions due by 2027.

Lessons from 5G include limiting optionality and starting with standalone architecture. Core 6G priorities include deployment on existing sites, harmonized new spectrum (notably upper 6 GHz), AI-native design, improved performance and sustainability, stronger security, integrated sensing, and non terrestrial network integration.

## INTRODUCTION

I finished my dissertation at ENST Paris in 1996<sup>1</sup>, based on research in the European research projects RACE/ATDMA. The project developed a system concept for 3G/UMTS, and 3G was the first mobile communication system designed to serve both telephony and data. 3G started in 2000, followed by 4G/LTE, fully optimized for the Internet, in 2010; 5G then started in 2020.

In this article, we highlight where the industry stands in mid-2026 with respect to the journey toward 6G. We also explain 6G standardization and industry roadmap. Furthermore, we describe the essence of what 6G will address, the deployment scenarios, spectrum aspects, and its key technical characteristics.

## STANDARDIZATION

### From 2G to 6G

Since the introduction of 2G/GSM around 1990, we have seen a new generation of mobile systems every 10 years. Initial 5G deployments started in 2019 (Korea, US), with France

---

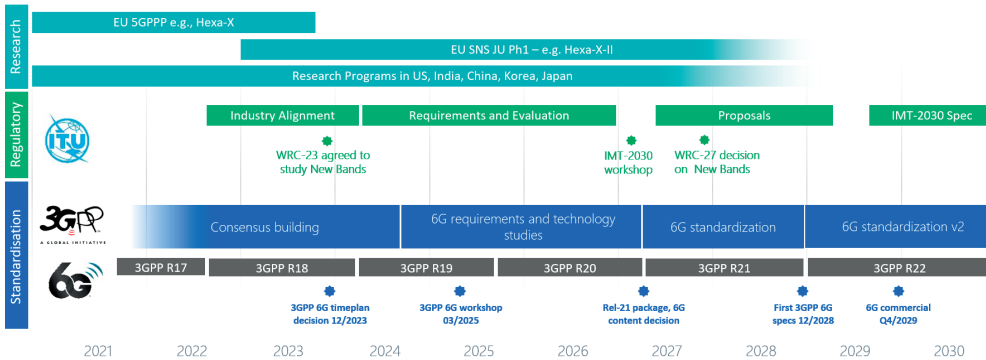
<sup>1</sup> Allocation des ressources dans des systèmes radiomobiles à réservation par paquets. 1996, 150 p., ref: 88 ref, Thesis number, 96 ENST 0012, Dropmann, Ulrich; Godlewski, Philippe (Advisor (for a thesis or dissertation)), École nationale supérieure des télécommunications, Paris, France (Degree-grantor).

following in late 2020<sup>2</sup>. For 6G, the same timeline holds true. Recently, many companies confirmed their intent to enable 6G commercialization from 2029 onwards<sup>3</sup>.

## Standardization of 6G

Formally, 6G standards are developed through an interplay between the ITU and 3GPP, a model established since 3G. The ITU defines 6G as IMT-2030<sup>4</sup> with a serie of recommendations. First, the framework/objectives were published in 2023, and the detailed technical performance requirements are expected to be published in December 2026. Later, in 2028, the ITU will evaluate potential standard technology candidates against those performance requirements.

Meanwhile, the real technical standardization work is carried out in 3GPP, which is an industry-led global standardization effort bringing together all key regions (Europe, US, India, China, Korea, Japan). It was established almost 30 years ago for the standardization of 3G – hence its name – and has been the heart of mobile standards ever since. The technical 6G work started with a kick-off workshop in March 2025<sup>5</sup>, and the current study phase will make decisions on all key aspects of 6G, be it radio design, architecture, security, and the like.



Picture 1: 6G Time Line (Source: Nokia).

Since 4G/LTE, this model of standardization has truly achieved one global standard, and the industry is committed to continuing it in 6G. Truth be told, the model is not immune to 2026 geopolitical realities, which could still lead to fragmentation. More than ever before, political ambitions around 6G in key regions emphasize digital sovereignty, de-risking, decoupling, and achieving respective global leadership.

<sup>2</sup> Orange’s 5G network reaches 160 cities across France, Juan Pedro Tomas, January 11, 2021, RCR WirelessNews.

<sup>3</sup> Qualcomm and Other Industry Leaders Commit to 6G Trajectory Towards Commercialization Starting from 2029 Onwards, March 2<sup>nd</sup>, 2026, Qualcomm Press Release, <https://www.qualcomm.com/news/releases/2026/03/qualcomm-and-other-industry-leaders-commit-to-6g-trajectory-towa>

<sup>4</sup> IMT toward 2030 and beyond (IMT-2030), Website of ITU-R, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/pages/default.aspx>

<sup>5</sup> 3GPPworkshopon6G, February 2025, <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/6gworkshop-2025>

## WHAT IS 6G?

There are different ways one can describe 6G, there are the ambitions as stated by the ITU in IMT-2030 recommendations, or one can look at key research programs such as the European 6G Flagship project Hexa-X-II<sup>6</sup>. We will concentrate on key aspects that govern current 3GPP standardization and industry planning.

### Learning from 5G

There is a sentiment that 5G over-promised and under-delivered. This sentiment is more pronounced in countries such as France (and much of central Europe) compared to countries with more advanced 5G networks and services, such as the US, Finland, China, and some Gulf countries<sup>7</sup>. The situation is a result of different regulatory and economic contexts; hence, the blame placed on 5G technology is not fully justified.

However, there are still learnings. Ultra-reliable low-latency communication (UR-LLC) was one of the key differentiators of 5G versus 4G/LTE; this has not materialized significantly to date. UR-LLC is needed to support Ethernet bus-type traffic, which is common in industry automation/private 5G. However, compared to mainstream 5G devices, this segment is relatively niche, and leading 5G system-on-chip companies prioritize requirements supporting smartphones and low-cost wearables. That is an important lesson for all hardware-impacting requirements that are relevant only for vertical markets.

Also, options in 5G standards proved problematic, in particular 5G non-standalone (5G NSA). In 5G NSA network deployments, the main connection stays on 4G, including control signaling, and is connected to the 4G network; the 5G radio is only a secondary boost. As this allows a relatively cost-efficient way to claim 5G introduction, many networks started with this configuration and have been slow to transition to full 5G (5G standalone). 5G NSA limits the benefits of 5G as outlined in the GSMA study<sup>8</sup>. Only full 5G (5G standalone) provides all 5G benefits, including support for network slicing. Slicing creates unique, logical networks on top of a physical network, e.g. for enterprise and critical applications. We expect the 6G standard to return to the principle that 6G starts with a standalone architecture. To set future expectations better, the industry now talks about 6G day 1 to describe what one can expect from first commercial 6G, as opposed to the ambitious 6G ITU IMT-2030 vision.

### Deployment requirements

6G should be deployed on top of existing infrastructure and cell sites and should not require network densification to provide consistent coverage. This has two main implications. First, it means that it can be supported by then state-of-the-art base station (BS) hardware on top of 5G. That requirement precludes radically different technical choices for 6G compared to 5G, in particular if those choices provide no step-change in gain. Second, a new standard will always be used to provide additional capacity and speed and, hence, will be deployed on new radio spectrum; new 6G spectrum must support that deployment requirement.

---

<sup>6</sup> European level 6G Flagship project Hexa-X-II, <https://hexa-x-ii.eu/>

<sup>7</sup> <https://media-assets-prod.gsomainelligence.com/The-State-of-5G-2026.pdf>, The State of 5G 2026, March 2026, GSMA, Figure i 5GI scores by market, Q4 2025.

<sup>8</sup> <https://media-assets-prod.gsomainelligence.com/The-State-of-5G-2026.pdf>, The State of 5G 2026, March 2026, GSMA, Figure 3, Support of 5G advanced features NSA and SA.

## Spectrum

In November 2025, Europe took a principal decision on a key band, the “upper 6 GHz band”<sup>9</sup>. This fundamental decision ensures a solid base for 6G introduction in Europe. It provides enough capacity (over 600 MHz) for 6G services to provide significant improvement over 5G. Trials also demonstrated how that band, using advanced 6G technology, achieves a coverage range comparable to the currently main-used 5G band (C-band, 3.5 GHz)<sup>10</sup>. The 6 GHz band remains a 6G priority in much of the world<sup>11</sup>, whereas the US and some countries decided to rely on other bands. Harmonizing spectrum for 6G/IMT will be one priority of the ITU World Radiocommunication Conference 2027 (WRC27).

## THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI): AI-NATIVE 6G

The ChatGPT launch in 2022 was a big-bang moment for artificial intelligence; and “AI-native 6G” has become a design paradigm. That comprises several aspects.

### Artificial intelligence as dominant network load

To date, streaming video (YouTube, Netflix, TikTok...) dominates 4G/5G traffic, which is very downlink-dominated, relatively constant in its data rate, and tolerant to some delay. Lately, cloud gaming has been on the rise, with tighter latency requirements. The impact of AI traffic is still relatively new, but we expect it to grow strongly before 6G introduction. The traffic will be more uplink-heavy and more bursty in nature, with tighter latency requirements. That said, there are still big unknowns in relation to future AI traffic—for instance, the types of applications and media that will finally prevail, and how AI processing will be split between end devices and the network.

### Intent-based networking / semantic communication

Machine-to-machine AI communications will transmit intent rather than content, which in turn reduces traffic but increases the need for ultra-low latency as well as computing capabilities in the network.

### Artificial intelligence to enhance network performance

In 6G radio design, AI can be used in several ways to enhance performance and efficiency, such as how data is mapped on waveforms; the use of AI-enabled receivers; adaptive and more accurate beamforming; and decision-making on scheduling and power control algorithms.

---

<sup>9</sup> European Commission, Radio Spectrum Policy Group, RSPG Opinion on Long-term vision of the upper 6 GHz band, [https://radio-spectrum-policy-group.ec.europa.eu/document/download/3301c2fd-7bff-4ecf-bfcd-cfb572a5972f\\_en?filename=RSPG25-031final-RSPG-Opinion-Upper\\_6GHz\\_band.pdf](https://radio-spectrum-policy-group.ec.europa.eu/document/download/3301c2fd-7bff-4ecf-bfcd-cfb572a5972f_en?filename=RSPG25-031final-RSPG-Opinion-Upper_6GHz_band.pdf)

<sup>10</sup> Nokia Press Release: Nokia and Telia complete successful outdoor trial in 6 GHz range with Massive MIMO radio, June 4 2024, <https://www.nokia.com/newsroom/nokia-and-telia-complete-successful-outdoor-trial-in-6-ghz-range-with-massive-mimo-radio/>

<sup>11</sup> The importance of 6 GHz for Mobile Evolution, GSMA, <https://www.gsma.com/connectivity-for-good/spectrum/6-ghz-for-imt/>

## **Artificial Intelligence for zero-touch operations of networks**

6G will embed AI natively to enable zero-touch operations. AI agents increasingly support intent interpretation, proactive issue resolution, and end-to-end orchestration. The network evolves from a static connectivity platform into a self-optimizing system, delivering material reduction in operational expenditures.

## **OTHER 6G PRIORITIES**

### **Performance**

Compared to 5G higher capacity will be achieved from extreme massive MIMO (Multiple Input/Multiple Output) antenna constellations, sharing bands with 5G, and using wider spectrum bands. Given the changed traffic pattern, uplink performance will be increased.

### **Sustainability**

In addition to performance, increase in sustainability is key 6G goal. When it comes to the technical standard work this mainly translates into energy efficiency in radio networks, where most of the networks energy is used. Efficiency for performance / capacity and energy consumption per bit go hand in hand. One important design principle is a more linear relationship of power consumed with network load, leading to substantial lower consumption in low load scenarios.

### **Security**

6G design considers new security threats. Cryptographic algorithms will be quantum resistant. 6G design will also treat new threat vectors from AI and use AI-based security mechanisms (e.g., stronger authentication, output validation, secure data pipelines, rejection of unauthorized APIs, proactive threat detection, automated incident response).

### **Integrated Sensing and Communication (ISAC)**

6G will be designed to enable Sensing of objects (similar to RADAR) via the 6G Base Station alongside the typical communication role of mobile networks. Use cases vary from factory / warehouse safety in indoor deployment to road monitoring or Drone tracking / intrusion detection outdoor and critical networks.

### **Non-terrestrial networks (NTN) / satellite integration**

There is a trend for low earth orbit (LEO) satellite networks to shift from proprietary technology to 5G and later 6G, and 3GPP standardization enables that. This impacts some radio design parameters to cater for increased delay, and the architecture to enable seamless service between terrestrial and non-terrestrial coverage.

## **WHAT IS AHEAD?**

As written above, the critical 6G study phase is to be finalized by March 2027, which will establish the principal design decisions. After that, the normative standardization work follows, where the detailed technical specifications will be developed. These specifications are then expected to be finalized toward the end of 2028. The industry will be ready for commercial introduction “from 2029 onwards”. Market introduction is a guessing game as of today, but it is a fair assumption to correlate it to the state of 5G. That would see coun-

tries like the US and China as rather early adopters, with France and much of central Europe potentially following. Very likely, India will play a significant leading role in 6G.

A technology-leading operator recently formulated: “In mobile communication we have seen a new generation every 10 years but a business transformation every 20 years; with the first generation enabling that new business and the second optimizing for it”. In that model, 1G enabled mobile telephony, then 2G/GSM optimized for that business. 3G/UMTS opened the door to mobile data/the Internet, and 4G/LTE optimized for the Internet/Smartphones. So, 5G opened the door beyond smartphones/mobile broadband, and 6G will be the system optimizing for that. We believe this portrays a positive and realistic view of the expected 6G impact.

# 5G for business

04 **Preface**  
*Philippe HERBERT*

06 **Introduction**  
*Xavier LAGRANGE and Laurent TOUTAIN*

## THE 5G DEVELOPMENT STRATEGY

08 **National Strategy on Industrial 5G**  
*Thomas ORAZIO*

As the fifth generation of mobile networks, 5G is a key factor in the adoption of future digital technologies by the various sectors of the French economy, and is essential to their vitality in the 21<sup>st</sup> century.

France therefore launched a national strategy on 5G and future telecommunications network technologies in 2021 as part of the France 2030 plan. Its strategic objectives are to support the French industrial sector in its rapid adoption of this technology and to master these new generations of communication technologies in order to address the challenges of strategic autonomy and digital sovereignty.

Several initiatives have been undertaken to meet these objectives: financial support for testing new innovative use cases, fostering and structuring the ecosystem to facilitate the sharing of feedback, identifying and removing regulatory barriers... The strategy also supports the emergence of national players offering key technological building blocks, through innovation funding schemes.

These initiatives have enabled the deployment of private 5G across 116 sites (33 of which on a permanent basis) spread throughout the country. The DGE remains committed to this issue and is considering the next steps to take to continue its work.

15 **The Industrial 5G Alliance: a collective driver to accelerate the roll-out of private 5G networks**  
*Thomas HERVIEU*

5G technology has been developed specifically for a professional usage. Private 5G network addresses needs for mobility, wide-area coverage, service continuity and infrastructure control that are becoming increasingly important in industry, logistics, energy and transport. While the product ecosystem is now in place, large-scale adoption is still concentrated among major organizations able to manage complex projects. The challenge for the coming years is therefore less about proving the technical relevance of private 5G than about making it accessible to a wider range of companies by linking it more directly to use cases, AI, digital twins and industrial transformation priorities.

19 **Spectrum management for professional uses**  
*Patrick LAGRANGE*

The deployment of wireless networks to meet professional needs requires access to suitable frequencies in sufficient quantities. The legislator has entrusted the French Regulatory Authority for Electronic Communications, Postal Services and

Press Distribution (Arcep) with the task of regulating access to the necessary frequency resources. For several years, Arcep has been contributing to the establishment of a flexible regulatory framework tailored to the various needs expressed by stakeholders in the professional ecosystem.

**24 5G and health**  
**Anne PERRIN**

5G marks an evolution in mobile communications towards more diverse digital uses. Its introduction has raised questions and concerns, often amplified by rumors or misinformation. The assessment of the risks associated with 5G has received attention in many countries, including France. This evaluation relies on scientific knowledge about the biological and health effects of radiofrequency fields. These data form the basis for regulations to protect the public and professionals. It also helps identify research needs to improve knowledge and reduce remaining uncertainties. This article provides a foundation for understanding the topic by highlighting what distinguishes 5G, or does not, from previous generations of wireless communication or other sources of exposure present in our environment regarding risk.

## **TECHNOLOGIES AND ARCHITECTURES**

**35 Enterprise 5G: a tool for competitiveness  
in industry and critical services**  
**Viktor ARVIDSSON**

What is enterprise 5G? In France, we tend, somewhat narrowly, to view it as the solution for connecting factory workshops, and to reduce it to industrial 5G.

This narrow definition has its uses and serves our industrial policy by focusing efforts on a unifying objective that is absolutely necessary and has great potential; nevertheless, enterprise 5G must also be viewed in a broader context.

Beyond these questions of definition, we also believe it is useful to address issues of network architecture, developments, use cases and criteria, as well as the barriers to deployment.

We also consider positioning and the differences compared to Wi-Fi to be important points, which also relate to significant operational decisions by industry players. In this context, we can highlight the advantages of 5G for security and resilience, which truly help to make enterprise 5G a trusted solution for the competitiveness of our industries and critical services.

**45 Towards behavioural cybersecurity  
for private industrial 5G networks**  
**Cédric THIÉNOT**

The rise of private 5G networks in industrial environments is accompanied by a profound transformation of cybersecurity challenges. The proliferation of connected devices, the virtualization of network functions, and the introduction of network slicing are making threat detection more complex. Traditional approaches, based on device authentication and traffic analysis, are showing their limitations when faced with attacks that exploit seemingly legitimate behavior. This article highlights the value of a behavioral approach based on integrating an intrusion detection system (IDS) into the heart of the 5G architecture. This

system is capable of analyzing traffic, mobility, and usage patterns, and triggering appropriate remediation actions, either automatic or supervised.

**50 Very low Earth orbit satellites:  
the new frontier of enterprise 5G**  
*Pierre POPINEAU*

Terrestrial mobile networks are increasingly struggling to meet the growing global demand for connectivity. Non-Terrestrial Networks (NTN), integrated into 5G standards, offer a new approach by using low and very low Earth orbit satellite constellations to complement terrestrial infrastructures. After reviewing the evolution of satellite communications, from geostationary systems to modern LEO constellations, this article explores the main challenges of TN/NTN integration, including latency reduction, handover management, synchronization, spectrum allocation, and deployment costs. It also highlights the emergence of a new industrial ecosystem at the intersection of space and telecommunications, as well as the European strategic challenges surrounding future sovereign 5G and space-native 6G infrastructures.

**56 5G platforms: contributions from the PEPR  
'Networks of the Future' and CMA IMTfor5G+ projects**  
*Philippe MARTINS and Xavier LAGRANGE*

The development and deployment of 5G networks rely on experimental platforms that are crucial for validating innovations and ensuring scientific reproducibility. These infrastructures rely heavily on open-source software solutions, such as OpenAirInterface, srsRAN, Open5GS and Free5GC.

The PEPR 'Networks of the Future' programme, led by the CEA, the CNRS and IMT as part of France 2030, structures this national research by pooling resources. It is structured around major pillars such as RF-Net for radio frequency experimentation, SLICES-FR for large-scale 5G experimentation, and NGC-AIoT, focused on cellular networks for the Internet of Things with embedded AI.

At the same time, the CMA IMTfor5G+ project adapts and creates tools for teaching. It offers a variety of educational setups, ranging from full software simulation to the use of real radio links in a controlled environment. These platforms enable students and professionals to master 5G protocols, radio metrology and the challenges of network orchestration, thereby preparing future experts to address the issues of sovereignty, security and energy efficiency in digital infrastructure.

## **5G USE CASES**

**67 Orange, the operator of private 5G networks**  
*Charles-Henri MORIN and Nicolas CARRERE-DEBAT*

Orange has been committed to 5G since its inception and has continuously invested over the past 5 years to roll out this innovative technology across its networks. This is now enabling our enterprise customers from all across the industry to speed up their digital transformation based on a nimble and tailored wireless connectivity. In this article we elaborate on the wild field of applications, spanning from transportation to health or event management, showing how our operated private networks – based on both nation-wide and very localized infrastructure – fit our customer's needs.

**71 The Radio Network of the Future (RRF):  
5G supporting security and emergency services**  
*Guillaume LAMBERT*

Between operational ambition and sovereign imperative, the deployment of Réseau Radio du Futur (RRF), French mission critical public safety broadband mobile network, involves far more than technological modernization: it redefines the landscape of critical communications for decades to come.

When firefighters enter a burning building, when criminal investigation units coordinate an arrest, when emergency medical services activate a crisis plan—every second counts, and every radio exchange can determine a life-or-death outcome. These communications, currently provided through low-bandwidth radio networks deployed in the 1990s, are being completely overhauled by leveraging the full potential of 5G mobile networks. The RRF is not simply an upgrade of radio communication systems: it is a revolution in how the State communicates in crisis situations.

**81 Critical mobile broadband at Paris Airports**  
*François MUNEROT*

In 2020, Paris airports carried out a major transformation of their telecommunications infrastructure by migrating from legacy private mobile networks to a mission-critical mobile broadband architecture based on 3GPP standards. Historically built on voice services and narrowband technologies (TETRA, PMR), communication systems must now support data-intensive use cases, operational digitalisation, and the requirements of the Smart Airport concept. The convergence of telecommunications and information systems, the progressive shift away from Wi-Fi as a workaround solution, and the adoption of 4G/5G enable full mobility, service continuity, and mission-critical reliability.

Deployed across all airport platforms, this shared network architecture now supports more than 30,000 devices and delivers high performance in complex and constrained environments. This evolution paves the way for new industrial, logistics, and IoT use cases while significantly enhancing the safety and operational resilience of airport infrastructures.

**93 5G and the challenges facing rail transport in Europe**  
*Marion BERBINEAU*

Modernizing railway communication systems in Europe is a key challenge for addressing safety, efficiency, and interoperability. ERTMS (European Rail Traffic Management System), deployed since the 1990s, has increased line capacity by 25% thanks to three main components: ETCS (train control system), GSM-R (2G-based radio network), and ATO (automated train operation, optional). However, the planned obsolescence of GSM-R, whose support will end around 2035, requires a transition to FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), based on 5G.

FRMCS, currently being standardized and developed, must guarantee the continuity of critical applications (signaling, control and command) while enabling new services (maintenance, video surveillance, autonomous trains). Europe plays a central role in the funding and coordination of FRMCS through collaborative projects. This article provides an overview of the various developments at the European level.

**101 The connected city and its evolution with the arrival of 5G*****Norbert FRIANT***

The Rennes Métropole region has historically been at the forefront of digital technologies thanks to policies aimed at attracting research centres, educational institutions and companies in this sector. As a result, the City and Rennes Métropole have developed a culture of experimentation (through trial and error and continuous improvement) with various stakeholders (researchers, operators, manufacturers, authorities, activist groups, etc.) and also with citizens, by creating ad hoc bodies (Citizens' Council for Responsible Digital Technology). Several technologies have succeeded one another: cable, fibre, 2G mobile, RFID, TETRA, LoRa WAN, etc.

Today, 5G promises to bring together various functionalities whilst seeking to reduce the environmental footprint. New questions are arising, particularly regarding the legitimacy of local authorities becoming operators within the meaning of ARCEP or for the specific needs of public services.

**107 5G as the fifth hospital utility: when the mobile network becomes a healthcare tool*****Sylvie CASSAUBA-TIRCAZOT and François DALLAY***

From the regulatory ban of 1995 to the care infrastructure of tomorrow, mobile telephony in hospitals has undergone a complete reversal. Successive studies have dispelled initial concerns and established the smartphone as a fully-fledged clinical tool. Faced with the proliferation of connected devices and the structural shortcomings of indoor radio coverage, healthcare facilities are turning to next-generation active DAS.

Combined with a 5G Standalone architecture, these systems unlock network slicing, local data processing and metric-level indoor positioning – capabilities that wifi alone cannot provide. The 5mart Ho5pital project, a laureate of the CEF Digital programme and deployed at the Bordeaux University Hospital in partnership with Bouygues Telecom and Ericsson, serves as a real-world testbed for these use cases. 5G SA cannot be reduced to a mere evolution of 4G: it represents a paradigm shift for the digital hospital.

**115 Industrial 5G and AI: synergies to be harnessed*****Pierre-Jean BENGHOZI***

5G struggles to demonstrate its profitability when viewed simply as an evolution of mobile connectivity. This article shows that its true economic model emerges through its integration with operational artificial intelligence. As a distributed infrastructure, 5G reveals its full potential in industrial environments demanding low latency, reliability, and real-time data processing.

AI thus acts as a complementary and enabling technology, allowing for the development of critical applications (industry, healthcare, energy) and a shift towards performance-based B2B business models. This convergence reconfigures the digital value chain around the network-edge computing-AI triad, and repositions telecom operators as strategic players in critical infrastructure, at the heart of industrial sovereignty issues.

**121 On the road to 6G – The state of industry progress  
in a changing world**  
***Ulrich DROPMANN***

The article describes the status of the global journey toward 6G in mid 2026. Building on a 10 year generational cycle, industry targets initial 6G commercialization from 2029 onwards. Standardization follows the established model between ITU and 3GPP: ITU defines IMT 2030 requirements, while 3GPP develops the technical specifications, with key decisions due by 2027.

Lessons from 5G include limiting optionality and starting with standalone architecture. Core 6G priorities include deployment on existing sites, harmonized new spectrum (notably upper 6 GHz), AI native design, improved performance and sustainability, stronger security, integrated sensing, and non terrestrial network integration.

*Issue editor*  
*Xavier Lagrange*

# Ont contribué à ce numéro

**Viktor ARVIDSSON** est directeur de la Stratégie et des Affaires publiques pour Ericsson France. Il est diplômé de Télécom ParisTech (1996) et du MBA de l'INSEAD (2004).

Il a été chef de projet technique chez Bouygues Telecom, puis a rejoint Ericsson en 2000, d'abord comme responsable de l'ingénierie radio, avant d'évoluer dans différentes fonctions liées à la stratégie, au *business development* et au *marketing*.

Viktor Arvidsson est membre du comité de direction du syndicat professionnel Alliance française des industries du numérique (AFNUM), ainsi que du conseil scientifique de Transpolis.

→ ***La 5G professionnelle : un outil de compétitivité pour l'industrie et les services critiques***

**Pierre-Jean BENGHOZI** est directeur de recherche émérite au CNRS et à l'École polytechnique. Il a une triple formation d'ingénieur comme ancien élève (X76), de docteur en Sciences des organisations et d'HDR en économie de l'Université Paris-Dauphine. C'est un des précurseurs, reconnu internationalement, des recherches sur les modèles économiques du numérique, notamment dans les industries culturelles et créatives.

Il a dirigé, jusqu'en 2013, le pôle de recherche en économie et gestion (École polytechnique-CNRS) et la chaire « Innovation et régulation des services numériques » qu'il avait fondée en partenariat avec Telecom ParisTech et Orange. Il a été ensuite directement impliqué dans la régulation du secteur, comme membre du Collège de l'Arcep, membre du comité de prospective de la Cnil et comme président de la mission d'évaluation du Plan France Très Haut Débit, réalisée à la demande du Gouvernement et de la Commission européenne. Il est régulièrement sollicité sur ces questions, au niveau national et international, auprès d'institutions publiques comme d'entreprises privées.

Pierre-Jean Benghozi a publié plus de 200 contributions académiques et enseigne régulièrement dans plusieurs grandes universités parisiennes et étrangères, notamment comme professeur à l'Université de Genève de 2019 à 2021 ou au Business Science Institute (Luxembourg) depuis 2014. Comme enseignant-chercheur, il s'est aussi profondément impliqué dans l'administration de la recherche : direction de laboratoire, présidence de section du Comité national de la Recherche scientifique, présidence de la Société française de Management, conseils scientifiques...

→ ***5G industrielle et IA : des complémentarités à exploiter***

**Marion BERBINEAU** a obtenu son diplôme d'ingénieur en informatique, électronique et automatique à Polytech Lille (ex-EUDIL) en 1986, puis son doctorat en électronique à l'Université de Lille en 1989. Elle est directrice de Recherche (équivalent à professeur titulaire) à l'Université Gustave Eiffel (anciennement Ifsttar) depuis 2000. Elle a été directrice du laboratoire Leost de 2000 à 2013, puis directrice adjointe du département COSYS de 2013 à 2017.

Ses travaux, reconnus à l'échelle internationale, comptent plus de 4 128 citations (indice h = 29), 67 articles de revues, 168 communications de conférences, 30 contributions à des ouvrages et 5 brevets. Elle a dirigé ou contribué à 35 projets européens et 15 projets nationaux (dont 7 en tant que chef de file). Elle a encadré 28 doctorants, 20 post-doctorants et 13 ingénieurs dont beaucoup travaillent aujourd'hui dans le milieu universitaire ou l'industrie, et avec lesquels elle a maintenu des liens étroits.

Avec d'autres chercheurs, elle coordonne et anime la recherche ferroviaire à l'Université Gustave Eiffel à travers la Fédération Rail. Elle est également présidente du Réseau européen d'excellence en Recherche ferroviaire (Eurnex) et vice-présidente de l'ERRAC (Conseil consultatif européen de recherche ferroviaire), où elle représente le monde universitaire.

Ses intérêts de recherche actuels portent notamment sur les communications sans fil pour les véhicules connectés et automatisés (trains et voitures) (propagation radio, caractérisation et modélisation des canaux, SDR, MIMO, Communications train à train, ITS-G5, GSM-R, LTE, FRMCS, 5G NR, 6G, RIS et ISAC...). En participant à divers programmes-cadres, puis aux initiatives Shift2Rail et Europe's Rail JU, elle a contribué à des innovations numériques telles que la radio cognitive, les architectures de communication sécurisées et l'interopérabilité des réseaux hétérogènes. Ces technologies constituent des éléments clés pour la numérisation de l'exploitation ferroviaire.

→ ***5G et défis du transport ferroviaire en Europe***

**Nicolas CARRERE-DEBAT** occupe le poste de responsable de la Création technique des offres mobiles chez Orange. Doté d'une expertise solide dans le secteur des télécommunications, il contribue activement à l'élaboration et à l'innovation des solutions mobiles proposées par l'opérateur.

Son parcours au sein d'Orange lui a permis de développer une connaissance approfondie des enjeux propres à l'entreprise, ainsi que des attentes variées de ses clients à travers différents marchés.

→ ***Orange, l'opérateur des réseaux privés 5G***

**Sylvie CASSAUBA-TIRCAZOT** est diplômée ingénieure des Mines de Nancy en 1995 et titulaire d'une maîtrise en informatique de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Cette double formation, alliant rigueur scientifique et culture numérique, pose les fondations d'une carrière jalonnée de responsabilités croissantes.

Elle débute comme développeuse informatique au sein de sociétés de services, de 1995 à 2001, avant de rejoindre Lafarge Granulats Services puis le ministère de l'Agriculture, acquérant ainsi une expérience transversale dans des environnements exigeants et contrastés.

En 2006, elle entre à l'Institut Bergonié, centre de lutte contre le cancer de la région Nouvelle-Aquitaine, en tant que responsable des applications médicales. Elle y prend la mesure des enjeux spécifiques du numérique en santé et accède dès 2009 au poste de directrice des systèmes d'information, qu'elle occupe pendant près de 15 ans.

En 2023, elle rejoint le CHU de Bordeaux en qualité de directrice adjointe de la direction du Numérique. Dans ce rôle, elle assure la coordination globale du projet européen 5mart Ho5pital, et s'investit particulièrement dans le développement des cas d'usage innovants autour de la 5G, ainsi que dans leur intégration à la plateforme d'intelligence artificielle de l'établissement.

→ ***La 5G comme cinquième fluide hospitalier : quand le réseau mobile devient un outil de soins***

**François DALLAY** est diplômé de l'EPITA Telecom, école d'ingénieurs spécialisée dans les technologies de l'information et des télécommunications. Après avoir débuté sa carrière dans le monde de l'intégration, il rejoint le CHU de Bordeaux il y a plus de 20 ans et y construit l'essentiel de sa carrière professionnelle.

Pendant 15 ans, il y assume la responsabilité du service télécom de l'établissement, supervisant l'ensemble des infrastructures de communication d'un des plus grands centres hospitaliers universitaires de France. Il assure depuis lors la responsabilité de l'entité Systèmes et Réseaux, ce qui lui confère une vision globale des infrastructures numériques de l'établissement.

Aujourd'hui chef de projet au sein de la direction du Numérique, il pilote deux missions stratégiques complémentaires. La première porte sur l'environnement numérique du SAMU 33, et notamment son infrastructure télécom, un enjeu critique pour la qualité de la réponse aux urgences médicales. La seconde s'inscrit dans le cadre du projet européen 5mart Ho5pital, dont il coordonne, pour le CHU de Bordeaux, les Work Packages 5 (*edge computing*) et 6 (cas d'usage). À ce titre, il collabore étroitement avec l'équipe projet de

Bouygues Telecom Business, œuvrant à l'intégration concrète de la 5G en environnement hospitalier.

→ *La 5G comme cinquième fluide hospitalier :  
quand le réseau mobile devient un outil de soins*

**Ulrich DROPMANN** dirige le département Normalisation et Engagement auprès de l'écosystème chez Nokia. Il est chargé de la normalisation à l'échelle mondiale et régionale, y compris des aspects liés au spectre radioélectrique. Il est vice-président et membre du comité exécutif de la Global Mobile Supplier Association (GSA). Il a également siégé au conseil d'administration du Metaverse Standards Forum (MSF) de 2024 à 2026. Entre 2022 et 2024, il a été membre du conseil d'administration de l'Innovative Optical and Wireless Network Global Forum (IOWN-GF). De 2018 à 2022, il a également été membre du conseil d'administration de la 5G Association for Connected Industries and Automation (5G-ACIA). Avant d'occuper son poste actuel, Ulrich Dropmann était responsable des activités liées à l'environnement industriel chez Nokia Networks. De 2007 à 2012, il a dirigé l'équipe de normalisation 3GPP de NSN et a occupé le poste de chef de délégation auprès du 3GPP. De 1996 à 2007, il a occupé divers postes au sein de l'unité de R&D de Siemens Mobile Networks. Il était responsable des activités de normalisation au sein de l'unité commerciale des réseaux centraux et gérait les activités 3GPP de Siemens. Il a joué un rôle déterminant dans la définition de l'architecture UMTS ainsi que dans la mise en place de la gestion de projet au sein du 3GPP.

Ulrich Dropmann est titulaire d'un doctorat de l'ENST / Télécom ParisTech (1996). Son domaine de recherche portait sur la définition de l'interface radio 3G, et ses travaux s'inscrivaient dans le cadre d'un programme de recherche collaboratif de l'UE (RACE II ATDMA). Il est titulaire d'un master (diplôme d'ingénieur) en télécommunications de l'Université RWTH Aachen (1992).

→ *On the road to 6G - Status of industry progress in a changed world*

**Norbert FRIANT**, ingénieur en télécommunications, a intégré la société finlandaise Nokia au milieu des années 1990 (responsable du service RAN : Radio Access Network) et a donc vécu les déploiements massifs de la téléphonie mobile à travers l'Europe et plusieurs pays à travers le monde. Intégré au Customers Centre pour l'Europe et Nord West Africa pour effectuer le transfert de centres R&D *via* des tests et expérimentations dans des projets pilotes puis vers des installations industrialisées sur sites pour différents clients opérateurs.

Il fait le choix de quitter Nokia mi-2002, car les transferts de la R&D hors Europe étaient engagés. Directement recruté par Rennes Métropole pour créer un service TIC (Technologie de l'Information et de la Communication) qui allait devenir le Service numérique, avec la prise en main par la collectivité pionnière d'une politique en matière d'infrastructures (réseau métropolitain en fibre, réseaux radio de type WiMax, objets connectés LoRa Wan...), selon une approche par les métiers et usages, avec les citoyens, dans une logique de création de communs (licence libre, ouverture de données publiques, Wiki, Open HardWare avec la création du LabFab...).

Norbert Friant a contribué à l'animation du débat citoyen en 2021 lors de l'arrivée de la 5G et aux contestations qu'elle a suscitées. Il a formulé un guide de préconisations sur la téléphonie mobile. Il intervient à l'Université de Rennes (Sciences économiques, Réseaux et Télécoms), à l'IAE de Nantes, au CNAM, etc. Adeptes de la robustesse, il est marathonnien depuis 1992.

→ *La ville connectée et son évolution avec l'arrivée de la 5G*

**Philippe HERBERT** a commencé sa carrière dans une *start-up*, Dassault Systemes, aujourd'hui *leader* mondial des logiciels de conception 3D et des solutions de gestion du cycle de vie des produits. De 1982 à 1996, il y a occupé différents postes de direction, il a notamment construit et dirigé la politique de partenariats et d'acquisitions en tant que directeur *business development*. De 1996 à 2003, il participe à la relance de l'implantation

française/européenne du fonds d'investissement Américain Partech International. De 2003 à 2020, en tant que General Partner de Banexi Ventures Partners devenu Kreaxi, il a investi dans 25 sociétés. De 2021 à 2025, il est Président de la Mission 5G Industrielle, un des fondateurs de l'Alliance 5G industrielle. Il est également membre du Conseil d'administration de plusieurs *start-ups* et de Wilco, membre de la gouvernance de la SATT Lutech et du pôle de compétitivité Cap Digital.

Au sein de l'association française des investisseurs pour la croissance (France Invest), il a présidé pendant 4 ans la commission Financement de l'Industrie.

→ **Préface**

**Thomas HERVIEU** contribue au développement des réseaux mobiles privés et à la structuration de l'écosystème des 5G industrielles en France. Au sein de l'Alliance 5G industrielle, il participe aux actions de sensibilisation, de diffusion et de mise en relation entre acteurs technologiques, industriels et institutionnels.

Son travail porte en particulier sur les conditions de passage à l'échelle des réseaux 5G privés, l'identification des cas d'usage à valeur et l'ancrage de ces solutions dans les besoins concrets des filières industrielles.

→ ***L'Alliance 5G industrielle : un levier collectif pour accélérer le déploiement des réseaux 5G privés***

**Patrick LAGRANGE** est le chef de l'unité « Fréquences et Technologies » de l'Arcep depuis 2022.

À ce titre, il est notamment en charge de la mise en place du cadre réglementaire adapté à l'attribution des fréquences radioélectriques pour l'exploitation de réseaux privés à très haut débit.

Il est diplômé de CentraleSupélec et titulaire d'un master en économie, avec plus de 30 ans d'expérience dans le domaine des communications mobiles, ayant exercé diverses fonctions (R&D, *consulting*, avant-vente) dans des sociétés fournissant des équipements d'infrastructure de réseaux.

Il a rejoint l'Arcep en 2018 pour préparer et mener l'attribution des fréquences de la bande 3,5 GHz pour la 5G.

→ ***La gestion du spectre pour les usages professionnels***

**Xavier LAGRANGE** est ingénieur de l'École Centrale des Arts et Manufactures (1984), docteur de l'ENST maintenant appelé Télécom ParisTech (1998) et habilité à diriger des recherches (Université Paris XIII).

Après avoir travaillé de 1985 à 1990 à Alcatel Radiotéléphone puis de 1991 à 2000 à Télécom ParisTech (anciennement ENST), Xavier Lagrange est maintenant professeur à IMT Atlantique ; il est responsable de l'équipe de recherche ADOPNET du département (Réseaux, Télécommunications et Services) de l'IRISA et est spécialiste des réseaux mobiles 5G. Créateur de nombreux MOOCs, il est également coordinateur du projet IMTfor5G+ pour développer les « compétences et métiers d'avenir » en faveur de la souveraineté numérique dans le cadre de France 2030.

→ **Introduction**

→ ***Plateformes 5G : contributions des projets PEPR réseaux du futur et CMA IMTfor5G+***

**Philippe MARTINS** est professeur à Télécom Paris, au sein du laboratoire LTCI, dans l'équipe Réseaux, Mobilité et Services. Ses activités d'enseignement et de recherche s'inscrivent dans le champ des systèmes et réseaux de communication mobiles cellulaires. Il contribue aux travaux de Télécom Paris sur les réseaux 5G et 6G, l'Internet des objets (IoT), la virtualisation des fonctions réseau, la planification automatique des réseaux et la sécurité de l'interface radio des systèmes cellulaires.

À l'interface entre recherche fondamentale, expérimentation et innovation technologique, il pilote plusieurs initiatives structurantes. Il est responsable de la plateforme IMT SDR

Lab, destinée au développement et à l'évaluation de nouvelles fonctionnalités réseau dans un environnement de radio logicielle. Les axes mis en avant autour de cette plateforme portent en particulier sur l'allocation et le placement de ressources pour les fonctions réseau virtualisées, la robustesse et l'automatisation des déploiements, ainsi que la sécurité des systèmes cellulaires.

Son activité scientifique s'étend également à l'intégration entre réseaux terrestres et non terrestres. Il est partenaire du projet BPI 5G NTN mmWave, consacré au développement d'une infrastructure satellitaire fondée sur la 5G non terrestre et à son interconnexion avec les réseaux existants.

Parallèlement à ses activités de recherche, Philippe Martins participe à la formation des ingénieurs et spécialistes des télécommunications à Télécom Paris, notamment dans des enseignements liés à l'IoT sans fil, aux réseaux mobiles, aux réseaux mobiles avancés et à la virtualisation. Il contribue ainsi à former les futurs experts des infrastructures numériques de nouvelle génération, en associant approche académique, expérimentation sur plateforme et vision industrielle des évolutions du secteur.

→ ***Plateformes 5G : contributions des projets PEPR réseaux du futur et CMA IMTfor5G+***

**Charles-Henri MORIN** est directeur adjoint des Réseaux et Services mobiles à la direction technique des réseaux d'Orange France.

Il a occupé différentes fonctions dans les équipes techniques d'Orange depuis 2008.

Charles-Henri Morin est diplômé de Télécom Paris (promotion 2000).

→ ***Orange, l'opérateur des réseaux privés 5G***

**François MUNEROT** est directeur adjoint de la Business Line Mobile Pro chez Hub One, la filiale IT et télécom du groupe ADP (Aéroports de Paris).

Ingénieur de formation (1998), il possède une expertise reconnue dans la conception, le déploiement et l'exploitation de réseaux mobiles privés critiques à destination d'environnements industriels complexes.

Au cours de sa carrière, il a participé à la réalisation de nombreuses infrastructures de communication sécurisées pour des acteurs industriels en France et en Europe, couvrant des besoins variés en voix, données et services critiques. Depuis plus de 17 ans, il contribue au développement de Hub One, en accompagnant la transformation des systèmes de radiocommunication sur les plateformes aéroportuaires parisiennes ainsi que pour des clients industriels nationaux et internationaux.

Il a joué un rôle central dans la construction du modèle, les études, la conception et le déploiement du nouveau réseau mobile privé 4G/5G des aéroports parisiens, l'un des projets de modernisation les plus structurants du secteur. À ce titre, il co-pilote aujourd'hui les activités de commercialisation et de développement de cette infrastructure, en lien avec les enjeux de connectivité critique, de performance et de convergence des usages voix et données.

Parallèlement, il intervient sur d'autres projets industriels majeurs, notamment dans le secteur portuaire, avec de nouveaux déploiements 5G critiques dans les grands ports maritimes français, comme celui du Havre. Ses activités couvrent à la fois les dimensions techniques, stratégiques et opérationnelles des réseaux mobiles professionnels de nouvelle génération.

→ ***Le haut débit mobile critique dans les Aéroports de Paris***

**Thomas ORAZIO** est diplômé de l'École nationale des Mines de Saint-Étienne, promotion 2016. Après une première expérience dans le conseil, il part travailler à l'Ambassade de France en Lettonie pour aider au développement de la coopération scientifique et universitaire entre les deux pays.

Il rejoint la direction générale des Entreprises en 2019 pour travailler sur les enjeux de la réduction des impacts environnementaux du numérique. Il est actuellement chef de projets Réseaux du futur et travaille principalement sur les politiques industrielles

visant à développer l'offre technologique du secteur télécom. Il travaille notamment sur la stratégie d'accélération 5G et Réseaux du futur de France 2030.

→ ***Stratégie nationale sur la 5G industrielle***

**Anne PERRIN** est docteur en biologie, habilitée à diriger les recherches et diplômée en philosophie (master *Culture et santé*). Expert-conseil indépendante, elle est spécialiste du risque électromagnétique, avec 20 ans de recherches sur les effets biologiques et sanitaires des radiofréquences au Centre de recherche du Service de santé des armées (devenu IRBA), puis au CNRS. Impliquée dans des sociétés savantes internationales et nationales, elle est membre de la Société Française de Radioprotection, dans la section *Rayonnements non ionisants* dont elle a été vice-présidente et présidente.

Elle a participé, en tant qu'expert, au rapport ANSES 2009 « Radiofréquences et santé » et à l'expertise collective sur la 5G pour le Gouvernement Wallon (2020-2021). Par ailleurs, elle a été membre de la commission « Risques liés à l'environnement » du Haut Conseil de la santé publique de 2017 à 2019. Elle est également co-auteur du livre *Champs électromagnétiques, environnement et santé*.

→ ***La 5G et la santé***

**Pierre POPINEAU** est diplômé de l'École des Mines (promotion P15), en option Géostatistiques et probabilités appliquées. Après un stage de fin d'études à l'OCDE sur l'utilisation de modèles de probabilités spatiales pour quantifier la répartition du niveau de vie en France, il effectue une thèse de doctorat au sein de l'École Normale Supérieure et INRIA Paris, sous la direction de François Baccelli. Soutenue en 2023, sa thèse porte sur l'utilisation de processus aléatoires spatiaux pour modéliser des réseaux de télécommunications sans fil. Peu de temps après, il rejoint Univity, où il est chargé du développement du jumeau numérique de la constellation et de la conception d'outils de simulation numérique pour le dimensionnement d'une méga-constellation de satellites en très basse altitude.

→ ***Les satellites en orbite très basse : la nouvelle frontière de la 5G professionnelle***

**Cédric THIENOT** est une figure reconnue des télécommunications et des technologies de nouvelle génération, avec plus de deux décennies d'expérience à la croisée des réseaux, du *streaming* et de la diffusion vidéo. Docteur en intelligence artificielle de la Sorbonne, il s'est imposé comme un contributeur clé aux standards internationaux (3GPP, DVB, MPEG) et est l'auteur de plus de 30 brevets dans le domaine des télécoms. Chief Scientific Officer chez Firecell, il définit et pilote la stratégie de recherche, d'innovation et de standardisation, tout en étant étroitement impliqué dans la conception et la vision produit. Entrepreneur accompli, il est le fondateur d'Expway et de Firecell, deux sociétés qu'il a développées avec succès à l'international autour des technologies de diffusion et des réseaux mobiles avancés. Au fil de sa carrière, il a collaboré avec des *leaders* mondiaux tels que Verizon, Samsung, NTT ou la BBC, et a contribué à de nombreux projets de recherche d'envergure internationale. Reconnu pour sa capacité à transformer des avancées technologiques complexes en solutions concrètes, il incarne une combinaison rare d'excellence scientifique, de *leadership* stratégique et de vision produit.

→ ***Vers une cybersécurité comportementale des réseaux 5G privés industriels***

**Laurent TOUTAIN** est titulaire d'un doctorat en informatique de l'Université du Havre qu'il a obtenu en 1991. Il est professeur à l'école d'ingénieurs IMT Atlantique. Il a travaillé plusieurs années sur IPv6 et a participé à la création du groupe G6 qui rassemble depuis 1995 chercheurs et industriels autour d'IPv6. Ses recherches actuelles portent sur les protocoles et les architectures spécifiques aux besoins de l'IoT. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages sur les réseaux et les RFC.

→ ***Introduction***