

PANORAMA DES TECHNOLOGIES DE
CONNECTIVITE

ENJEUX ET EVOLUTIONS A VENIR

GRUPE DE TRAVAIL « INNOVATION »

Table des matières

1. Synthèse	2
2. Technologies de connectivité	3
2.1. Connectivité cellulaire 5G & 6G	3
2.2. Réseaux privés – 5G d’entreprise	6
2.3. Connectivité locale et LAN & Wi-Fi	8
2.4. Communications à fibre optique – liens structurants	10
2.5. Communications à fibre optique – réseaux d’accès	11
2.6. Connectivité satellitaire	13
3. Briques technologiques	16
3.1. Bandes SubTHz & THz	16
3.2. Optique non guidée	17
3.3. Communications optiques quantiques & QKD	18

1. Synthèse

Enjeux et contexte

Le secteur des télécoms tient un rôle crucial au sein d'une société qui s'appuie de plus en plus fortement sur le numérique pour son fonctionnement quotidien et en attend donc fiabilité, disponibilité, efficacité et simplicité. Parallèlement, l'impératif d'une meilleure performance environnementale, le besoin de rester souverain à l'échelle européenne pour des technologies devenue essentielles, ainsi que l'apparition d'évolutions techniques dimensionnantes sont en train de transformer l'écosystème.

Ce document a pour but de présenter un panorama des grandes solutions de connectivité ainsi que de donner un aperçu des enjeux et évolutions auxquels ces solutions se trouvent confrontées. En complément, un petit groupe de « briques technologiques » à même d'avoir un impact important est également mis en avant, même si leurs applications dans l'une ou l'autre de ces grandes solutions ne sont pas encore matures. Il ressort de ces analyses qu'au sein d'une Europe qui continue de constituer un centre de gravité pour l'écosystème télécoms mondial, la France, par son tissu académique, industriel et de PME de pointes est elle-même un poids qui compte beaucoup. Cette position demeure toutefois fragile dans un contexte de grandes évolutions et d'effort de R&D très importants en Asie, en Amérique du Nord ainsi que chez certains de nos voisins européens. Seule une innovation soutenue par une recherche suffisamment ambitieuse et alimentant une présence forte dans les instances de normalisation mondiale permettra de la conserver.

Evolutions

Le mouvement vers la virtualisation des réseaux est là et touchera à termes tous les segments. Il se fait en l'absence d'acteur européen leader sur les technologies cloud, laissant donc à l'écosystème télécoms la charge de faire apparaître une infrastructure « TelcoCloud » européenne à même de supporter cette évolution tout en préservant sa souveraineté. Plusieurs initiatives vont dans ce sens, tel le projet Open Source « Sylva ». Le succès de telles initiatives dépendra de leur capacité à rassembler autour d'elle une masse critique suffisante.

Par ailleurs, dans le contexte d'un marché arrivant à maturité, l'évolution des réseaux optiques et radios est impactée à la fois par l'arrivée de nouvelles approches technologiques (perspective 6G, accès satellite, optique sans fil, nouvelles fibres optiques, cryptographie et distribution quantique de clé) dont les rôles exacts restent encore à définir, mais aussi par le manque de spectre pour la 6G (le devenir de la bande 6.425 – 7.125 GHz en étant un enjeu critique) et par un impératif de soutenabilité économique, sociétale et environnementale qui contraint toutes les évolutions possibles.

Prochaines étapes

Plus que jamais l'écosystème télécoms reste un écosystème de portée globale qui a bâti son efficacité sur cette approche globale. L'Europe y occupe une place d'importance et n'aurait rien à gagner à une fragmentation régionale de cet écosystème. Néanmoins, l'industrie européenne et française ne seront en mesure d'y jouer un rôle majeur qu'avec :

- un effort significatif en R&D permettant d'aborder ces évolutions dans leur pleine dimension ;
- une présence accrue dans les instances de normalisation ;

- un contexte réglementaire stable.

Ces axes seront explorés dans les prochains mois au travers d'une collaboration entre plusieurs groupes de travail du CSF « Infrastructures Numériques ».

2. Technologies de connectivité

2.1. Connectivité cellulaire 5G & 6G

Enjeux

Les réseaux cellulaires ont joué un rôle majeur d'aménagement du territoire. Numérisation de la société aidant, il apparaît que les usages de ces réseaux deviennent de plus en plus larges mais aussi de plus en plus incontournables. La présence d'un service cellulaire de qualité devient donc un facteur clé de l'attractivité des territoires.

Les technologies 5G et suivantes doivent donc répondre non seulement à un enjeu accru de couverture territoriale mais aussi à une hausse de l'attente de qualité de la connectivité, à la fois en termes de performances techniques (débit, capacité, latence) mais aussi opérationnelle (disponibilité, fiabilité, facilité d'emploi), le tout en garantissant la pérennité économique du modèle pour l'ensemble des acteurs.

Par ailleurs de très importants enjeux de maîtrise de l'impact environnemental des réseaux sont apparus (consommation d'énergie et de matières premières).

L'un des grands enjeux de la décennie à venir sera donc de parvenir à baisser la consommation d'énergie des réseaux, parallèlement à la hausse de leur capacité, tout en le faisant d'une manière soutenable, économiquement et environnementalement, à long terme.

Evolutions et enjeux « proches » – la 5G

La technologie 5G est relativement mature et si certaines évolutions sont encore à attendre, du côté des terminaux comme du côté réseau (ex : 5G SA), l'essentiel de la capacité est déjà là. Le potentiel d'évolution restant relève plutôt de la manière dont les technologies 5G sont mises en œuvre (souplesse de configuration, facilité et efficacité des déploiements) que de la performance directe de ces technologies.

Les perspectives de déploiements en bande millimétriques demeurent mais plutôt dans l'optique de couvrir des zones spécifiques ayant des besoins de connectivité très particuliers (stade, aéroport, centre de conférence...) que pour obtenir une couverture générale du fait de la forte densité de déploiement que cela supposerait.

En termes de trafic, la tendance haussière du trafic se poursuit. Le développement de l'IA dans les terminaux pour des usages non télécoms aura des impacts sur le trafic (volume, densité...) qui restent encore à identifier.

Evolutions des architectures de réseaux

Indépendamment de la « G » stricto sensu, la softwarisation des réseaux, c'est-à-dire le remplacement d'une part croissante d'équipements physiques remplissant une fonction réseaux (PNF – Physical Network Function) par des fonctions réseaux définies logiciellement, donc n'ayant qu'une existence virtuelle (VNF – Virtual Network Function), puis dans un second temps l'instanciation de ces fonctions logicielles sur des infrastructures de type « cloud » (on parle alors de CNF - Cloud Network Function) représente la principale transformation des infrastructures de connectivités.

L'exploitation efficace des réseaux ainsi transformés en infrastructure mixte physique & virtuelle constitue une compétence essentielle qui reste en cours de développement. L'automatisation avancée et l'utilisation de l'IA sont des outils technologiques très attendus pour faciliter l'exploitation de ces nouveaux réseaux qui seront, par leur nature virtuelle et « cloudifiée », beaucoup plus dynamiques qu'auparavant.

L'infrastructure permettant l'hébergement de ces CNF, le « Telco-CaaS », est également un actif essentiel dont la maîtrise effective est clé pour garantir la performance, l'efficacité énergétique et économique, la fiabilité et la résilience de l'infrastructure réseau. En Europe, l'initiative Open Source « Sylva » va dans ce sens.

Ces deux points sont capitaux pour permettre une mise en œuvre réellement impactante de ces technologies et en faire bénéficier la société en pleine mesure.

Evolutions post-2030 – Les perspectives de la 6G

La 6G portera son lot d'innovation technologique. Toutefois, la seule évolution technologique telle que, par exemple les méthodes de codage et de transmission de l'information, n'amènera probablement qu'un gain en capacité et performance limité à un ordre de grandeur de l'ordre 20 %. L'augmentation du spectre disponible et les évolutions des modalités de déploiement sont porteuses d'un potentiel de gain capacitaire nettement plus conséquent, mais soumis aux contraintes économiques et réglementaires.

L'émergence de la 6G se fera dans le cadre d'une évolution douce, avec notamment la recherche d'une compatibilité accrue avec les générations précédente.

Au-delà du gain capacitaire et de l'accompagnement de la montée en débit, les principaux défis de la 6G seront de parvenir à répondre aux impératifs nouveaux de soutenabilité :

- Environnementale : notamment *via* une stricte maîtrise de la consommation d'énergie des infrastructures télécoms, une très importante évolutivité ainsi qu'une forte capacité de réemploi des équipements ainsi qu'une pondération marquée de la consommation de matières premières.
- Economique : en minimisant le coût de mise en œuvre et en proposant des services et fonctionnalités à valeurs, correspondant à un besoin réel associé à un bénéfice suffisant pour en justifier le développement et la pérennité économique. L'évolutivité de la technologie doit permettre le développement de tels services *a posteriori*.
- Sociétale : en proposant des réponses aptes à bénéficier à l'ensemble de la société, que ce soit par une meilleure inclusion numérique comme par le support de services collectivement bénéfiques, par exemple en aidant les autres secteurs économiques à améliorer leurs

performances environnementales ou en facilitant l'accès aux services publics et/ou de premières nécessités.

Acteurs français et européens

Deux des trois principaux équipementiers mondiaux sont européen (Nokia et Ericsson) ainsi que quelques grands opérateurs (Orange, Vodafone, Telefonica, DT, TIM).

Malgré la présence d'acteurs comme OVH et du projet open source « Sylva » pour un outil « TelcoCloud » européen, on notera un certain déficit dans le domaine des hyperscalers et IaaS pourtant indispensables au modèle « TelcoCloud »

En France, Nokia, sur l'héritage d'Alcatel-Lucent reste un acteur clé dans les réseaux mobiles et profite de complémentarité avec les réseaux optiques. Orange est reconnu dans l'écosystème télécoms comme un des opérateurs les plus influents sur la 6G.

Par ailleurs, la France est dotée :

- d'une base industrielle et scientifique significative dans le domaine des systèmes satellite (Airbus, Eutelsat, Thales Aliena Space, CNES...);
- d'un tissu significatif de PME traitant de sujets en pointes, tels qu'Amarisoft (softwarisation des réseaux) et Crosscall (terminaux durcis);
- d'entreprises positionnées sur le volet « composants » (ST, Radiall, Murata, Sequans, Vichet...) ainsi que de plusieurs startups (3DSI – émanation du Xlim)
- d'un tissu dense de centres de recherche (ex: CEA-LETI, B-COM, INRIA) ou d'acteurs académiques (IMT, SupElec, Eurescom) travaillant souvent à volume contraint mais capable d'une réelle force d'innovation, et de s'inscrire dans l'écosystème de recherche européen.

Ressource en spectre – Perspective 6G

A l'issue de la CMR-23 :

- La bande 6425-7125 MHz a été identifiée pour les technologies mobiles en région 1 de l'UIT (Europe, Afrique, pays Arabes, ex-URSS) + Brésil, Mexique et 3 pays d'Asie (hors Chine). D'autres pays des régions 2 et 3 pourraient demander à la CMR-27 l'identification de cette bande dans les mêmes conditions. On peut considérer que cette bande a vocation à être harmonisée presque mondialement (le Brésil ayant par exemple demandé son identification IMT alors qu'il a attribué la bande au Wi-Fi)
- Pas d'autres ouvertures de bande identifiée ou à l'horizon 2030 pour répondre aux besoins « capacité – couverture » dans les bandes intermédiaires en Europe au-delà de la bande 7125-7250 MHz. Les autres bandes mises à l'étude pour la CMR-27 sur pression des pays en développement (Afrique, pays Arabes, Amérique latine) s'avèrent être indisponibles dans la plupart des pays développés car étant considérées d'intérêts stratégiques pour des usages Défense (OTAN) et spatiaux. A noter que, ayant attribué la bande 6425-7125 MHz au Wi-Fi, les Etats Unis ont lancé la recherche d'une bande intermédiaire alternative « 6G », une possibilité étant d'ores et déjà identifiée dans une bande spécifique à 13 GHz.

Le lancement de la 6G « grand public » à l'horizon 2030 sera donc probablement dans la bande 6425-7125 MHz, mais avec une pression forte de l'industrie Wi-Fi (Etats Unis/Canada, Corée, Arabie Saoudite) qui ont déjà mis en place un cadre national en faveur du Wi-Fi dans cette bande.

Il y aura donc une importante décision à prendre à niveau européen à l'horizon 2024/25 sur l'utilisation harmonisée de la bande 6425-7125 MHz dans le prolongement de la CMR 23 : doit-elle être dédiée 5G/6G, Wi-Fi ou partagée (ex : *indoor/outdoor* ou segmentation entre Wi-Fi et 5G/6G) ? Ce choix sera évidemment déterminant dans le potentiel capacitaire de cette nouvelle bande dans le contexte 6G.

Pour les bandes mobiles actuelles :

- Il pourrait être nécessaire de revoir des conditions d'utilisation des bandes fréquences, y compris mmW 26/42 GHz pour les adapter à la 6G.
- Les bandes sub-THz pour usages locaux (couverture limitée) seront probablement sous autorisation générale. La CMR-27 abordera la question de la protection des bandes passives et la CMR-31 une éventuelle identification. Les fréquences disponibles pour le mobile sont constituées de bloc de tailles variées entre quelques GHz et quelques dizaines de GHz. Il ne faut donc pas faire l'hypothèse d'un bloc de grande taille dans le spectre sub-THz (ex : 100 GHz).
- En Sub-GHz, des débats sont possibles pour l'accès à la bande UHF utilisée par la TNT (470-694 MHz) pour des usages réseaux mobiles après 2031, pour plusieurs besoins (commerciaux (6G) / PPDR (INT)/DEF). En France, la priorité reste aux besoins de la radiodiffusion dans cette bande.

Le cas particulier des réseaux 5G privés

5G réseaux privés et fréquences : les conditions techniques harmonisées (CE) sont attendues début 2025 dans la bande 3.8-4.2 GHz et mi-2024 pour les bandes mmW (27 et 42 GHz) ; harmonisation européenne volontaire (CEPT) dans les bandes 410-430 MHz et 450-470 MHz.

Au-delà de ces dispositions, les décisions sur l'orientation de ces bandes pour les réseaux privés relèvent du gouvernement et de l'Arcep. Actuellement, il existe des initiatives nationales dans la bande 2,6 GHz TDD (40 MHz) et une plateforme d'expérimentation 5G industrielle dans la bande 3.8-4 GHz

2.2. Réseaux privés – 5G d'entreprise

Les réseaux 5G privé ou PMR (Professional Mobile Radio)

La 5G privée est une technologie radio qui offre une connectivité 5G pour les besoins privés. La 5G privée fonctionne de la même manière qu'un réseau 5G public, mais permet à son exploitant (entreprises, fournisseurs tiers ou collectivités territoriales...) d'avoir le contrôle de son propre réseau et de le configurer librement selon ses propres besoins et priorités.

La 5G est porteuse d'innovations de ruptures pour de nombreux secteurs clés de l'économie. Elle peut notamment permettre de remplacer une infrastructure câblée, par exemple dans une usine, pour bénéficier de la souplesse d'un réseau radio, tout en conservant une qualité de service (QoS) similaire (ex : ligne de production en usine). Elle peut également permettre de créer une solution de connectivité là où une infrastructure câblée ou Wi-Fi n'était pas possible pour permettre une meilleure

gestion d'une infrastructure et de ses flux (notamment utilisation intérieure/extérieure d'un site industriel).

C'est un enjeu important de la numérisation des modes de production et de gestion, elle-même porteuse de gains significatifs tant sur le plan économique qu'environnemental.

Un réseau 5G est considéré comme privé si une organisation possède ou loue du spectre et des infrastructures 5G. Les réseaux privés 5G peuvent être déployés sous forme de services, de réseaux privés en propriété exclusive, hybrides ou « découpés ».

Principaux exemples d'utilisation des réseaux 5G privés :

- Installations industrielles présentant de fortes interférences et nécessitant fiabilité et couverture complète intérieure et extérieure.
- Hôpitaux et cliniques qui traitent des données sensibles et une mobilité transparente pour connecter des centaines voire des milliers de terminaux sans fil.
- Campus scolaires et universitaires qui nécessitent de grands déploiements intérieurs et extérieurs pour le personnel et les étudiants.
- Connectivité urbaine et métropolitaine pour l'IoT des villes intelligentes qui mixent l'accès aux données des intervenants d'urgence et l'utilisation par les citoyens privés.
- Lieux de divertissement et stades qui rassemblent un grand nombre d'utilisateurs dans des zones à très forte densité d'utilisateurs.

Technologie et mise en œuvre

Les déploiements de réseaux 5G privés sont une perspective intéressante pour les industriels en permettant de dépasser les limitations du Wi-Fi grâce à la possibilité d'utiliser du spectre licencié, donc protégé, d'une part, et à la capacité « native » de la 5G de fournir une meilleure garantie de QoS si le déploiement est fait de manière adaptée.

Différences majeures entre la 5G privée et le Wi-Fi :

- La zone couverte par une station 5G privée est nettement supérieure à celle d'un point d'accès WiFi. La 5G privée nécessite donc nettement moins de points d'accès que le WiFi pour couvrir la même zone physique.
- La mobilité entre points d'accès 5G privés est coordonnée pour se faire sans perte de données alors qu'en Wi-Fi une brève interruption de connexion reste nécessaire
- Un seul point d'accès 5G privé peut prendre en charge plus de connexions actives qu'un point d'accès Wi-Fi.
- Les capacités de « slicing » du réseau 5G privé permettent le contrôle, avec une granularité accrue, de la QoS pour chaque application.

Il existe de multiples schémas de collaboration avec les réseaux publics, de la complémentarité à l'indépendance totale, qui permettent de répondre à de multiples compromis entre coût, complexité, couverture et performance. Toutefois, la relative nouveauté de ces approches ainsi qu'un coût d'entrée qui reste perçu comme important, restent des limitations non négligeables de l'approche réseau privé dont l'équation économique moyen/long terme semble avantageuse mais reste à préciser.

Par ailleurs, certaines technologies « non 3GPP » sont également présente. On peut notamment citer :

- LoraWAN pour le très bas débit et très basse consommation dont la facilité de mise en œuvre séduit malgré les limitations d'usage (faible débit, bande sans licence).
- La norme DECT2020-NR (ou DECT-NR+) qui se veut plus simple à mettre en œuvre car exploitant la bande DECT et permettant des architectures maillées, sans pour autant viser les usages les plus exigeants de la 5G. Cette norme récente est poussée à l'ETSI par un petit consortium d'industriels hors de l'écosystème 3GPP et doit encore confirmer ses promesses.

2.3. Connectivité locale et LAN & Wi-Fi

Situation et enjeux : Les réseaux locaux (LAN) d'entreprise

Traditionnellement les LAN d'entreprise s'appuient principalement sur la technologie Ethernet filaire (en cuivre pour la desserte, en optique pour les liens structurants) alors que le Wi-Fi prend en charge les usages en mobilité (salle de réunion, espace ouvert...).

Une évolution récente est la disparition du cuivre par un recours croissant aux technologies optiques issues du G-PON (POL) pour la connectivité filaire ainsi qu'au Wi-Fi pour la desserte finale, jusqu'à en faire la principale solution d'accès au LAN. Le Wi-Fi est en effet perçu comme moins cher et mieux adapté aux nouveaux modes de travail (Open-Space, Espace dynamique, Flex) que le cuivre, ce dernier gardant toutefois comme caractéristique forte la possibilité d'alimenter certains équipements (point d'accès, téléphone IP, caméra...) directement *via* le câble Ethernet (PoE)

Parallèlement la technologie Wi-Fi a progressé en capacité et en débit, d'une part en reprenant les grandes technologies issues du monde mobile (OFDM, codage fort, MIMO) et d'autre part grâce à l'accès à des ressources spectrales qui se sont largement étendues. Les déploiements Wi-Fi deviennent donc nettement plus capacitaires mais également plus complexes à réaliser et plus demandeurs en matériel car devant répondre à un cahier des charges devenu plus exigeant.

Dans ce contexte, les constructeurs d'équipement Wi-Fi ont développé des solutions propriétaires pour faciliter le déploiement et permettre la coordination de réseaux Wi-Fi complexes afin d'assurer leur bon fonctionnement, mais l'absence d'un standard pour cette coordination empêche l'interopérabilité.

Situation et enjeux : Les réseaux locaux (LAN) domestique

Avec la hausse très importante des débits d'accès permis par le FttH d'une part, et le développement d'usages exigeants (streaming vidéo 4K, cloud gaming, visioconférence et télétravail) le Wi-Fi de la maison, qui a toujours été la principale technologie constituant les LAN domestiques, a également beaucoup évolué.

La passerelle domestique (ou la « Box ») reste le point central du LAN. Portée par l'évolution des standards Wi-Fi, elle a gagné en capacité et couverture en s'appuyant sur les mêmes solutions technologiques que les LAN d'entreprise ainsi que grâce au recours à des équipements complémentaires de type répéteurs Wi-Fi. Les études complexes préalables au déploiement d'un WLAN d'entreprise n'étant pas réalistes dans ce contexte, l'infrastructure Wi-Fi a également besoin d'une certaine capacité à s'auto-coordonner.

Le cuivre ne disparaît toutefois pas du réseau domestique : un réseau structuré cuivre est rendu obligatoire dans tous les logements neufs ou ayant fait l'objet d'une rénovation lourde par le décret du 03 août 2016, qui impose un câblage adapté à un réseau Ethernet (1 Gbit/s – câble grade 2 TV ; 10 Gbit/s – câble grade 3 TV)

Enfin, les objets connectés de la maison reposent sur différentes technologies spécifiques (ZigBee, Z-Wave...) mais également Wi-Fi dans ses versions « simples » (802.11n – 2,4 GHz)

Dans les réseaux domestique, l'enjeu de qualité de la connectivité repose donc fortement sur la performance de l'infrastructure Wi-Fi, dans un contexte d'usages de plus en plus demandeur et avec, en milieu urbain, une forte densité de réseaux Wi-Fi partageant les mêmes ressources spectrales.

Normes et réglementation

Les réseaux Wi-Fi s'appuient sur les bandes ouvertes, sans licences, aux RLAN. A la bande historique de 2,4 GHz (83 MHz) sont venus s'ajouter la bande 5 GHz (455 MHz) puis plus récemment la bande 6 GHz (480 MHz). Il est à noter que ces bandes profitent d'une certaine harmonisation mondiale.

La technologie Wi-Fi s'appuie sur la famille des standards IEEE 802.11. La version la plus récente en service étant le 802.11ax, aussi connue sous le nom commercial de Wi-Fi 6 (ou Wi-Fi 6E pour sa version étendue à la bande 6 GHz). Elle permet d'attendre un débit maximal de 9,6 Gbit/s sur des canaux de 160 MHz de large.

Le standard IEEE 802.11be est la version attendue en 2024 et permettra des débits maximaux de 46 Gbits sur des canaux pouvant atteindre 320 MHz. Elle sera commercialisée sous le nom de Wi-Fi 7

Les connectivités domotiques standardisées s'appuient essentiellement sur la famille de standard IEEE 802.15.4 ou des versions plus anciennes de standards Wi-Fi, mais avec une compatibilité plus limitée. L'alliance « Thread » ainsi que l'initiative « Matter » proposent un framework qui permettra à terme d'avoir une certaine interopérabilité dans cet écosystème diversifié

Le décret du 03/08/2016 impose un câblage cuivre (grade 2 TV) à même de supporter un réseau Ethernet cuivre (1 Gbit/s – grade 2 TV / 10 Gbit/s – grade 3 TV).

Scénario et enjeux technologiques

L'accroissement du spectre rendu accessible librement aux réseaux Wi-Fi va progressivement se ralentir alors que la demande de capacité plus importante se poursuit, notamment du fait du recours croissant au Wi-Fi en remplacement de l'Ethernet cuivre. Il en découle un besoin croissant d'augmentation de l'efficacité spectrale entraînant une complexification croissante des standards.

En milieu dense, la problématique de coexistence entre les nombreux réseaux partageant la même ressource spectrale ne peut que prendre de l'ampleur, posant la question de leur éventuelle coordination.

Enfin la montée en bande, qu'il s'agisse des bandes millimétriques (60 GHz) ou sub-THz, reste une option viable à long terme d'augmentation de la capacité malgré la portée limitée, si la problématique du coût de ces solutions venait à être levée.

Acteurs français et européens

- Peu d'acteurs européens dans les équipement actifs – Nokia, Comscope, Sagemcom et Ventiva (ex-Technicolor) pour les Box (intégration).
- Câble cuivre : Aginode/Nexans et les acteurs du Sycabel sur l'optique (Aginode/Nexans, Radiall) et les boîtiers de raccordement (Comscope)

2.4. Communications à fibre optique – liens structurants

Enjeux

De nos jours, le transport de données est très majoritairement optique. Cette prédominance est appelée à se renforcer pour les raisons suivantes :

- Accompagnement de l'évolution des besoins croissant en capacités (x2 tous les 2-5 ans), en particulier avec la demande exponentielle des acteurs de l'IA et des services cloud.
- Simplification de l'exploitation des réseaux optiques, grâce à un changement de paradigme dans l'automatisation qui permettra un passage à l'échelle durable.
- Réponse aux nouveaux enjeux de sécurité, au-delà de la confidentialité des données, en considérant leur intégrité et leur disponibilité au niveau de couche physique.

Normes et réglementations

Les solutions de transport optiques de cœur de réseaux sont encore largement propriétaires (hors standards). Un premier découpage entre infrastructures à fibre et terminaux d'extrémité a pris forme dans les câbles sous-marins mais l'initiative reste limitée. Le contrôle et la gestion des équipements vont en revanche vers une standardisation plus avancée.

Scénarios envisagés

La charge relative de trafic des utilisateurs continue de migrer de l'internet des opérateurs traditionnels vers l'intranet des fournisseurs de contenus dans certains segments du réseau. Parallèlement, la portée moyenne du transport de données se réduit par la duplication de contenus (technique du caching et Content Delivery Networks) ou la création de cloud de proximité (Edge) au bénéfice de la consommation énergétique.

Les technologies cohérentes numériques se généraliseront à tout le réseau et ouvrent de nouvelles opportunités de revenus par la mise à disposition de nouvelles télémétries (fiber sensing), qui renseignent non seulement sur le réseau mais aussi sur l'environnement alentours ou qui contribue au renforcement de la sécurité du transport de données en tant que service.

Maturité technologique et défis à relever

La course vers la limite de Shannon est terminée. Les prochains moteurs d'investissement seront probablement les gains en économies d'énergie, de simplification et la sécurisation plutôt que les réductions de coûts du matériel obtenues par l'intégration massive de l'optique et de l'électronique

(rendue nécessaire par le multiplexage spatial, seule solution pour soutenir la croissance des besoins mais moins productrice d'économies d'échelles).

Les nouveaux terminaux haut débit seront plus économes en énergie totale (au-delà de l'efficacité énergétique par bit transmis) ou ne seront pas, même si le coût matériel est réduit.

Les nouveaux automatismes de contrôle seront plus simples ou ne seront pas (pas d'enrichissement de fonctionnalités sans simplification).

On accordera une attention soutenue :

- Aux systèmes mettant en œuvre des fibres optiques à diamètres réduits (e.g. 200 μm) pour permettre l'intégration d'un nombre de fibres plus élevé et des systèmes de câbles sous-marins de plus grande capacité.
- Aux systèmes à fibre micro-structurée. Les performances optiques des fibres à cœur creux ont dépassé celle des fibres traditionnelles. Elles pourront engendrer de profonds changements dans la conception des réseaux optiques dans les années à venir, notamment *via* la réduction des pertes linéiques par 2 ou plus et par l'augmentation de la bande passante à plusieurs centaines de nm, combinées aux bénéfices déjà constatés (réduction de la latence par 30 %, moindre sensibilité aux effets non-linéaires, utilisation de nouvelles bandes de fréquence en dehors de 1,55 μm). Toutefois, la capacité à produire ces fibres en grande quantité et à des coûts raisonnables reste à démontrer tout comme la capacité à garantir une pérennité dans des conditions réelles de déploiement.
- Aux systèmes SDM (Spatial-Division Multiplexing) qui permettent d'augmenter considérablement les débits pour un même encombrement spatial, les fibres multi-cœurs ou les fibres à faible nombre de modes (Few-modes fibre) en sont des exemples (voir le rapport technique ITU-T GSTR-SDM).

2.5. Communications à fibre optique – réseaux d'accès

Enjeux

La distribution du « Très Haut débit » ou THD sur l'ensemble du territoire national est un enjeu économique comme sociétal. L'accès des locaux résidentiels et professionnels aux services associés au THD est devenu un enjeu d'attractivité et de développement des territoires. Le télétravail est devenu une réalité et la crise du Covid a montré l'importance de cette pratique et son impact sur notre société.

Le raccordement des locaux professionnels a permis de réaliser des gains de compétitivité et de qualités de services (télé médecine, téléassistance, numérisation des procédures...)

Les services proposés par les opérateurs, les administrations, les acteurs du domaine sont structurants pour notre société.

Evolutions des architectures et technologies, de l'ADSL au FttH :

La France a très tôt fait le choix ambitieux du déploiement du Très Haut Débit pour tous par un raccordement de la fibre optique jusqu'à l'utilisateur terminal (FttH). Ce déploiement s'est appuyé sur une infrastructure optique mutualisée sur sa partie terminale. Ce choix précurseur de la technologie FttH

sans étape intermédiaire a permis de concentrer efficacement les efforts économiques, technologiques et humains sur une solution pérenne, robuste et évolutive.

Le choix de la technique PON (Passive Optical Network), associée à une mutualisation des infrastructures terminales a considérablement optimisé les investissements tout en ouvrant les réseaux optiques déployés à la concurrence et à l'interopérabilité.

Les réseaux à coupleur passifs déployés (PON) diffusent aujourd'hui le très haut débit partagé sur le territoire. Cette technologie normalisée et largement disponible est évolutive et si les premiers réseaux utilisaient des interfaces 1 Gbits/s, ils ont rapidement migré vers le 10 Gbps/s et évolueront pour atteindre des débits de 50 Gbps/s sur les infrastructures existantes.

Cadre réglementaire, régulation, normalisation.

La Loi de modernisation de l'économie et le plan France Très Haut Débit ont facilité les accès aux infrastructures de télécommunications existantes, tant extérieures qu'intérieures aux locaux. Ils ont également défini des objectifs quantitatifs et qualitatifs et un calendrier ambitieux. Le choix d'un cadre technique commun (recueil du CEFO) fixé par le régulateur, l'Arcep, soutenu par un cadre normatif structuré par l'AFNOR a permis de déployer des réseaux très hauts débits interopérables.

Maturité technologique et défis à relever

Les technologies PON sont maintenant largement déployées. Elles sont encadrées par les recommandations de l'ITU et sont supportées par la plupart des acteurs.

Deux axes de travail se dégagent :

- L'augmentation des portées (« beyond 20 km ») : des scénarios jusqu'à 40 km sont considérés (voir ITU-T G.9807.1 Amd2).
- L'augmentation des débits avec la définition de l'ITU-T 50G-PON (voir ITU-T G.9804.3) dit « 50G-PON ».

Un défi majeur dans les réseaux d'accès sera de parvenir à une augmentation des performances tout en conservant des coûts acceptables des composants pour rester compatibles avec un déploiement auprès de chaque abonné. La diminution de la consommation énergétique et plus globalement de l'empreinte carbone forment un autre grand défi à relever : ils exigent une éco-conception tant des produits actifs que des produits passifs, en s'appuyant sur des outils rigoureux tels que des analyses de cycle de vie.

Acteurs français des infrastructures optiques (liens structurant et réseaux d'accès) :

La filière française est considérée en Europe comme une filière d'excellence tant dans le domaine de l'ingénierie que des équipements passifs constitutifs des infrastructures de distribution optique (concentrateurs de distribution et de mutualisation, fibres et câbles à fibres optiques, connectique...). Les acteurs industriels français sont reconnus et exportent leur savoir-faire et leurs produits en Europe et dans le monde.

Nokia est la seule compagnie en Europe capable de livrer une infrastructure optique complète. Nokia réalise 2/3 de sa la recherche mondiale en optique en France.

Orange est à la fois opérateur de transport et d'accès optique, acteur clé de la R&D optique et des réseaux optiques sous-marins avec Orange Marine.

Fibres optiques, câbles et accessoires	Accessoires pour réseaux optiques	Systèmes actifs
ACOME	COMMSCOPE	ERICSSON
AGINODE	CORNING POUYET	NOKIA
PRYSMIAN	IDEA OPTICAL	EKINOPS
	MALICO	
	TELENCO	
	PLP	

Et une myriade de PME fournisseurs de composants, Keopsys/Lumibird, Exail, Almae...

2.6. Connectivité satellitaire

Enjeux

Les satellites sont essentiels pour fournir facilement une connectivité globale, résiliente et s'inscrivant de manière complémentaire à la couverture des réseaux terrestres :

- Pour couvrir les zones mal/non desservies par l'infrastructure terrestre (montagne, ruralité, océan) en fournissant un lien de collecte pour un relai au sol ou un lien direct vers l'utilisateur final avec potentiellement un impact carbone limité (les satellites étant alimentés en énergie solaire)
- Pour la résilience en fournissant une connectivité de secours, notamment face à un évènement d'ampleur à altérer les réseaux terrestres.

Les cas d'usage « historique » du satellite (télédiffusion, connectivité de site isolé, défense) demeurent, mais se diversifient avec notamment le développement de connectivité alternative à l'infrastructure terrestre FttH vers des clients résidentiels et/ou entreprises (connexion principale ou de secours) ou encore l'émergence de connectivité directe vers les smartphones et la perspective de connectivité IoT pour la logistique ou le recueil de données de capteurs. Parallèlement les usages liés à la mobilité collective (connectivité large bande pour avions, bateaux, trains) se démocratisent tandis que la connectivité de la voiture individuelle marque la prochaine étape. Enfin, la connectivité satellite reste un outil essentiel de souveraineté, notamment car elle est essentielle pour les applications « sécurité civile » et « défense », mais aussi par l'existence même de cette filière industrielle.

Mise en œuvre, normes et réglementation

Traditionnellement, les satellites télécoms sont de très gros satellites (plusieurs tonnes) de fortes capacités et placés en orbite géostationnaire (GEO), d'où ils sont capables de couvrir une très large zone. Plus récemment a émergé le concept de « méga-constellation » formée d'un très grand nombre de « petits » satellites placés en orbite basse (LEO) d'où ils couvrent une zone limitée lors de leur passage.

GEO	LEO
<ul style="list-style-type: none"> - Coût par bit réduit. - Terminal utilisateur simple (pointage fixe) mais latence élevée (480 ms). - Pas de perspective d'accès direct à un smartphone. 	<ul style="list-style-type: none"> - A service équivalent, plus coûteux et plus complexe à déployer et opérer. - Nécessite un terminal plus cher mais offrant une basse latence (< 50 ms).

Plusieurs bandes de fréquence sont assignées pour utilisation satellitaire par la réglementation internationale (ITU), avec des propriétés et capacités différentes.

- Bandes basses (L, S) : applications à bandes étroites (messages ou Internet bas débit), avec terminaux personnels (téléphone) ou capteurs IoT et antennes « classiques ».
- Bandes hautes (C, Ku, Ka) : applications à bandes larges (jusqu'à 500 Mbit/s), avec antenne parabolique ou plate électronique.

Bien que souvent basés sur la forme d'onde standard DVB-S2, les protocoles utilisés pour le moment sont propriétaires. La standardisation par le 3GPP, à partir de la Release 17, d'une adaptation de la 5G aux infrastructures satellite (5G-NTN) forme une rupture. Même si certaines solutions « pré-5G-NTN » déployées aux USA (accès directe LTE, réemploi de spectre mobile) ne sont pas transposables dans le contexte européen, les futurs satellites seront probablement basés sur le protocole 5G-NTN. Le passage prochain à 5G-NTN permettra une intégration plus facile et complète (par ex : un seul 5G Core, un seul terminal avec plusieurs antennes, *handover* transparent pour l'utilisateur. Cela reste toutefois dépendant de la disponibilité effective de terminaux NTN à un coup acceptable et donc à l'émergence et l'adoption de chipset capable de couvrir les bandes concernées

Evolutions majeures attendues

Les déploiements, déjà en cours, de constellations LEO à couverture mondiale destinées au marché broadband (puis au « direct to phone » dans un second temps) tels que IRIS2 et EutelsatOneWeb (basés en Europe), Starlink et Kuiper (basés aux US) forment une évolution radicale de l'écosystème. Parallèlement l'évolution vers les protocoles ouverts du 3GPP (5G-NTN) permettant une plus forte intégration avec les réseaux terrestres et avec le cloud, puis la perspective dans un second temps (horizon 2030) d'une intégration native des réseaux satellitaires dans le cadre de la future 6G constitue une seconde évolution complémentaire mais tout aussi radicale.

Sur le plan technique la concrétisation à large échelle de ces évolutions supposera de dépasser certains verrous tels que :

- Gain en performances des antennes électroniques, tout en réduisant le coût de revient et en conservant la maîtrise de la chaîne d'approvisionnement.
- Forte hausse de la puissance de calcul embarquée pour supporter les charges télécoms 5G/6G tout en respectant les contraintes énergie et thermique du satellite.
- Emergence d'antennes actives et d'antennes de grandes tailles pour augmenter la capacité et améliorer le bilan de liaison.

- Développer les communications optiques spatiales inter-satellites pour le routage et sol-satellite pour dépasser les limitations des liens radios classiques.

Acteurs français et européens

La France joue un rôle de leader dans le secteur spatial Européens et dans la connectivité par le segment satellite, grâce à de nombreux acteurs tels que :

- Eutelsat Group – opérateur de satellites GEO et LEO et fournisseur de connectivité pour les différents marchés.
- Airbus Defense & Space – constructeur de satellites, intégrateur systèmes bout-en-bout et opérateur.
- Thales Alenia Space – constructeur de satellites et de systèmes « baseband ».
- EasilC – constructeur de chipsets DVB-S2.
- Greenerwave – startup constructeur d’antennes électroniques.
- Kineis – opérateur IoT.
- Fort écosystème spatial : Ternwaves, 3ZA, Exotrail, Leanspace, U-SPACE, SpaceLocker, Enensys, NanoExplore ...
- Autres en Europe : Opérateurs satellitaires : SES, Ecostar Mobile, ViaSat-Inmarsat

Contexte réglementaire – ressource spectrale

- La connectivité satellite pour l’accès direct (terminaux banalisés) dans les bandes réseaux mobiles sera traitée par la CMR-27. De façon transitoire, il est potentiellement possible de transposer les conditions HIBS par exemple pour la protection des réseaux mobiles terrestres aux frontières
- La bande MSS 2 GHz (1980-2010 MHz et 2170-2200 MHz) est déjà harmonisée au sein de l’UE avec des usages de services connectivité à bord des avions (Inmarsat) et IoT (Ecostar). Un renouvellement des autorisations est prévu en 2027, avec la possibilité de nouveaux services/acteurs pour 5G NTN (par exemple dans le cadre d’une phase 2 d’Iris²).
- HIBS (stations de base sur des plateformes de haute altitude) : Cadre international radio (RR) décidé par la CMR-23.
- Possible nouvelle bande IoT satellite harmonisée au niveau international à horizon 2027 CMR 27 (RR)

3. Briques technologiques

3.1. Bandes SubTHz & THz

Enjeux

Les bandes subTHz (au-dessus de 100 GHz) et THz doivent permettre d'accéder à un spectre encore peu utilisé donc bien plus disponible que le spectre actuellement utilisé et ainsi permettre une forte montée en capacité dans les réseaux radio. Toutefois, les conditions de propagation dans ces bandes sont limitatives, ce qui nécessite d'identifier des scénarios où cette technologie peut répondre à des besoins compatibles. Les technologies (matériel) permettant une utilisation de ce spectre ont encore besoin de mûrir pour devenir viables.

Normes et réglementations

- 1 standard existant IEEE – 802.15.3d (2020) : liens 100 Gbps point à point de 1 cm à + 100 m (spectre 252,72 GHz et 321,84 GHz).
- 1 groupe ETSI THz (2022-20XX) regroupant des industriels (Etats-Unis, Asie, UE) étudie des scénarios et caractérisations de propagation (spectre 100-300 GHz).
- Des publications académiques et recherches industrielles sur l'intégration du spectre au-delà de 100 GHz dans les futures normes xG.
- Spectre : des attributions possibles aux services fixe/mobile au-dessus de 92 GHz par blocs de quelques GHz à dizaines de GHz avec un enjeu de protection des bandes passives (EESS). Point ordre du jour de la CMR 27 : protection des bandes passives et CMR 31 (possible identification IMT).

Scénarios envisagés

Le principalement usage est l'accès haut débit fixe tel que le X-haul en bande D et W en complément des bandes E en cours de déploiement. Cela apporte de la ressource capacitaire mais, sur la base des travaux du groupe ETSI THz, n'introduit pas de scénario vraiment en rupture par rapport à l'état de l'art ou ce qu'adresse la 5G ou le Wi-Fi. Le principal argument reste donc l'augmentation de la bande passante ainsi que la possibilité d'avoir des communications très directives du fait de la propagation, ce qui peut aussi répondre à un objectif de sécurité.

La technologie offre également un potentiel intéressant pour la convergence entre communications et « sensing » : JCAS (Joint Communication and Sensing).

Maturité technologique et défis à relever

La propagation radio dans cette bande subit un affaiblissement important et est très sensible au masquage, ce qui nécessite des adaptations encore mal maîtrisées.

La maturité technologique des composants matériels est très basse. Les efficacités énergétiques sont encore assez mauvaises. Un gros effort de recherche est présent.

- Financement ANR (PEPR Electronique, Réseaux du futur, AAPG) pour la maturation de la technologie

- Financement SNS sur la thématique (important sur les appels 2022-2023).

La probabilité d’avoir une technologie intégrée disponible en 2030 (pour une perspective d’application mobile 6G par exemple) est très faible. Par ailleurs le coût très élevé du déploiement de solutions subTHz & THz, du fait de sa nécessaire très forte densité, forme un frein très fort à une utilisation généralisée.

Acteurs français (maturation, développement technologies – hors institut de recherche)

- Nokia (Bell Labs, BU xHaul) & MC2 technology (Projet BPI HyperLink)
- Sociétés du semi-conducteur français (technologie III-V), TiHive (sensing)
- Orange, Mitsubishi ITE, SIRADEL
- Acteur du monde de la défense

3.2. Optique non guidée

Enjeux

Le principe de l’optique non guidée est de permettre la mise en œuvre de liens optiques très haut débit en utilisant un signal optique (laser) se propageant en espace libre, donc dans l’atmosphère (application terrestre) ou dans le vide (application satellite).

Pour les application terrestre, l’usage principal est la mise en place de lien pour l’accès fixe et X-haul lorsque la mise en place d’un lien fibre n’est pas souhaitable ou possible. Dans un contexte spatial, le but est de permettre la mise en place de liens très haut débit entre satellite (ISL) de liens terre-espace plus capacitaires qu’un lien radio et sans problématique de gestion du spectre.

Normes et réglementations

Il n’existe pas encore de normes réellement établies à notre connaissance. Les différentes technologies existantes ou en émergence sont de type « propriétaires »

Il n’existe pas de réglementation du spectre lumineux mais la réglementation sur l’utilisation des lasers (protection des personnes) doit être prise en compte.

Scénarios envisagés

- En infrastructure terrestre : usage possiblement identique à ceux du THz/SubTHz (lien point à point ou X-Hauling), avec une meilleure capacité qu’un lien radio, une latence améliorée ainsi qu’un coût réduit et une mise en œuvre facilité par rapport à un lien fibre.
- En *indoor* : Lifi (point multi point pour accès indoor) mais avec un différentiateur vs Wi-Fi incertain si ce n’est les ressources supplémentaires ou la sécurité.

Dans les applications spatiales :

- Liens inter-satellites : déjà en utilisation pour permettre le routage dans l’espace, avec un risque d’émergence d’un standard provenant des Etats-Unis.

- Perspectives d'utilisation pour les communications Terre <-> espace pour des liens très haut débit, sans impact sur les ressources en spectre et résilient aux brouillages.

Maturité technologique et défis à relever

Dans la pratique, l'optique non guidée bénéficie d'un très riche héritage technologique des communications optique guidées.

Le principal défi reste lié à la propagation de la lumière en espace libre et à sa vulnérabilité notamment aux problèmes météo (pluie, brouillard, nuage) ou de blocage par obstacle (végétation, travaux, animaux...) ainsi qu'aux perturbations atmosphériques sur le canal Terre <-> Espace. Le scénario ISL est naturellement moins exposé à ces difficultés.

La précision du pointage optique à l'installation des équipements et sa préservation dans la durée reste également un point à faire mûrir.

Acteurs français (maturation, développements technologiques – hors institut de recherche)

- Startup sur la thématique Lifi – Infra rouge (Oledcom, Lucibel, Phillips (ex Luciom))
- Applications satellites (sol et intersatellite) et faisceaux terrestres : Cailabs, Airbus, Miratlas

3.3. Communications optiques quantiques & QKD

Enjeux

À court terme, la QKD (Quantum Key Distribution) permet de sécuriser des communications très confidentielles ou critiques en rendant possible le chiffrement de données sur un lien conventionnel par des clés échangées sur un canal quantique, les propriétés de ce dernier permettant, du fait des principes de la physique quantique, la détection immédiate de toute tentative d'interception de la clé *via* le théorème de non-clonage d'un état quantique inconnu. La maîtrise de cette technologie et la simplification de sa mise en œuvre relève donc d'un objectif d'accroître la sécurité des communications.

A long terme, la maîtrise des technologies de communications quantiques doit permettre, par exemple, la mise en réseau de futurs ordinateurs quantiques en leur permettant l'intrication des qubits distants ou le calcul quantique distribué.

Maturité technologique et défis à relever

La mise en place d'un canal quantique sur des fibres existantes est faisable. Les performances restent encore limitées, mais suffisent pour l'échange de clés. Certains produits commerciaux ont déjà permis la mise en place effective de liens QKD (i.e. un canal optique classique chiffré par des clés acheminées sur le canal quantique).

Il existe des pistes d'amélioration de performances : fibre et connectique à plus faible atténuation, rapidité des détecteurs, qualité des synchronisations.

La mise en œuvre la plus directe de la QKD est aujourd'hui faite sur des liaisons fibre « point-à-point » même si l'utilisation de « trusted nodes » a déjà été largement démontrée (cf, en France, les projets ParisRegionQCI / FranceQCI). D'importants travaux de R&D et de tests restent nécessaires pour dépasser cette limite et permettre le routage optique *via* des switchs adaptés (préservant les propriétés quantiques des photons et à terme permettre l'échange de qubits). Au-delà des technologies optiques adaptées ou novatrices, cela passera aussi par la maîtrise des répéteurs quantiques et la QKD par intrication.

Il existe aussi des travaux sur les communications quantiques en espace libre, que ce soit pour sécuriser des liens satellites ou dépasser la limite de distance

La QKD n'est cependant pas adaptée à la « radio », la sécurité des terminaux radio est donc à améliorer par d'autres moyens.

QKD et chiffrement post-quantique vont devoir se compléter efficacement pour obtenir une robustesse maximale selon une architecture qui reste à définir.

Normes et réglementations

Nombreux standards existants et drafts en cours à l'ETSI (ISG QKD, 16 documents actifs), à l'ITU-T (20 recommandations actives), travaux au CEN-CENELEC.

La préparation de la certification QKD est également traitée à l'ISO-IEC (deux documents existants).

Acteurs français (maturation, développements technologiques – hors institut de recherche)

- Exail Technologies (CV-QKD), Ekinops (élément optique actif), WelinQ (mémoires quantiques), ...
- Thales (Chiffreur), Crypto Next (hybridation PQC/QKD).
- Quandela, Pasqual, Quobly, Alice & Bob, Quobly, Eviden... (Processeurs quantiques).
- En Europe : Toshiba (UK), IDQuantique (Suisse), QKD en cours d'élaboration dans plusieurs startups ou entreprises (France, UK, Allemagne, Pays-Bas, Italie, Espagne...).