

Réseaux du futur

L'intégralité des notes

14 janvier 2020

En septembre 2018, l'Arcep a ouvert un nouveau cycle de réflexion pour anticiper l'évolution des réseaux, avec un horizon de 5 à 10 ans.

Les notes produites s'inscrivent dans ce travail de prospective et ont été réalisées sur la base d'échanges avec une diversité d'acteurs (opérateurs, équipementiers, fournisseurs de services, acteurs d'internet, académiques, etc.), de travaux de recherche et de l'expertise du Comité scientifique constitué à cet effet.

Ces documents constituent un état des réflexions à date. L'Arcep invite tous les acteurs qui le souhaitent à y contribuer en faisant part de leurs commentaires pour enrichir ces analyses, à l'adresse suivante : « reseaux-du-futur@arcep.fr ».

Sommaire

1. « Virtualisation des réseaux – Architectures agiles »	p.2
2. « Les voitures connectées »	p.16
3. Enjeux de connectivité : l'exemple des territoires « intelligents »	p.27
4. La gestion dynamique du spectre	p.45
5. L'empreinte carbone du numérique	p.63
6. L'intelligence artificielle dans les réseaux de télécommunication	p.78
7. L'agriculture connectée	p.89

Réseau du futur

Note n° 1

Virtualisation des réseaux : Architectures agiles

19 juillet 2019

Mise à jour de la version publiée en février 2019

Introduction

Un réseau de communications électroniques est composé de nombreux éléments distincts ayant une fonction spécifique : les routeurs permettent l'acheminement du trafic, les pare-feux permettent la mise en place d'un cloisonnement entre les différentes parties d'un réseau, etc. Historiquement, chacune de ces fonctions était assurée par des équipements physiques différents, parfois conçus spécifiquement pour le marché des télécommunications. Le concept de virtualisation qui consiste à séparer le logiciel du matériel, déjà très éprouvé dans le monde de l'informatique classique, appuie aujourd'hui deux révolutions dans le monde des télécoms :

- la capacité de dissocier le matériel du logiciel pour les équipements réseaux : plusieurs fonctions réseau peuvent par exemple s'exécuter de manière indépendante sur un même matériel générique. Les fonctions réseau peuvent également migrer d'un matériel à un autre. On parle de NFV (pour « *Network Function Virtualization* ») ;
- la capacité de configurer les équipements réseau à la volée en fonction des besoins de l'application/service au moyen d'un « contrôleur de réseau ». On parle de SDN (« *Software Defined Networks* »).

Ainsi, NFV vise à rendre polyvalents les équipements physiques utilisés en leur permettant de multiplier les fonctions qu'ils peuvent remplir (chaque fonction devenant un logiciel plutôt qu'un équipement physique propre) ; SDN vise pour sa part à rendre programmables l'acheminement et le traitement de flux. Ces deux concepts sont disjoints mais se développent concomitamment, la disponibilité de fonctions réseau virtualisé offrant une grande souplesse en matière de déploiement et de configuration du réseau. .

Il est aisé de concevoir le gain en termes d'efficacité de gestion que l'adoption de ces deux concepts peut engendrer pour un exploitant de réseau. Ce dernier peut par ailleurs espérer réduire ses coûts fixes en s'approvisionnant, en lieu et place d'équipements spécifiques, avec des équipements génériques sur lesquels s'exécuteront des fonctions logicielles. Ces apports potentiels sont toutefois à tempérer par le fait que de nouveaux coûts sont à considérer ; récurrents ou ponctuels, ceux-ci sont liés à l'exploitation de licences logicielles et leur intégration, une incertitude sur les modèles de tarification de ces licences, ou des coûts relatifs à la requalification du personnel exploitant ces nouvelles technologies.

Il est enfin indéniable que ces technologies auront un effet sur les modèles économiques des opérateurs (du côté des coûts par exemple, en réduisant ceux d'investissement et en augmentant ceux d'exploitation) et des équipementiers télécoms (en augmentant par symétrie la proportion de

revenus récurrents, et en favorisant la commercialisation par ces derniers de nouveaux services ou *a contrario* en les forçant à partager leurs marchés traditionnels avec d'autres acteurs du monde (l'informatique). De nouvelles offres pourraient également voir le jour : un opérateur pourrait ainsi proposer à des tiers (opérateurs ou clients entreprise) l'hébergement de fonctions propres sur son réseau, voire un réseau virtualisé complet, cœur de réseau compris, clé en main. Le recours aux fonctions de réseau sous forme de composants logiciels pourrait par ailleurs favoriser l'entrée de nouveaux acteurs sur toute la chaîne de valeur (nouveaux opérateurs, nouveaux équipementiers, nouveaux types d'acteurs *pure players* du logiciel etc.) et favoriser un repositionnement des acteurs établis dans la chaîne de valeur. L'apparition de ces technologies présente de nombreux défis et interroge la façon dont sont conçus, opérés, et réglementés les réseaux aujourd'hui :

- comment exploiter au mieux le potentiel de ces technologies au bénéfice de l'innovation et de la concurrence, tout en préservant les capacités industrielles nationales?
- comment assurer un niveau de sécurité adéquat alors que des fonctions historiquement disjointes sont amenées à être co-localisées au sein d'un même équipement ?
- comment assurer le respect des principes liés à la neutralité du net au sein d'un réseau à la capacité de reconfiguration quasi-infinie en temps réel ?
- la réglementation actuelle (notamment les obligations légales des opérateurs) est-elle *future-proof* ou au contraire doit-elle être adaptée pour tenir compte de ces évolutions ?
- les efforts actuels en matière de standardisation sont-ils suffisants pour garantir que l'intégration de ces nouvelles technologies ne conduise pas à une certaine forme d'enfermement technologique ?

La présente note, fruit d'un premier cycle d'auditions, détaille ces questions afin de permettre l'identification des enjeux qui devront faire l'objet d'une analyse plus approfondie.

1 La virtualisation des réseaux (NFV) et les réseaux logiciels (SDN)

1.1 Présentation des technologies et des possibilités offertes

1.1.1 La virtualisation des réseaux (NFV) : la polyvalence des équipements physiques

Un réseau de communications électroniques est constitué de plusieurs éléments ayant chacun une fonction bien particulière, parmi lesquels se trouvent des équipements en charge du contrôle d'accès au réseau, des pare-feux, des routeurs, des passerelles qui permettent l'interfaçage entre domaines distincts, des plateformes de service, des bases de données etc¹. Pour la plupart et historiquement, ces fonctions sont intrinsèquement indissociables de l'équipement (*hardware*) sur lequel elles sont exécutées ; ce couplage fait que l'équipement et sa fonction sont vendus comme un unique produit intégré par les équipementiers. La virtualisation des fonctions des réseaux (« Network Function Virtualisation » ou NFV) brise ce couplage, en s'appuyant sur des solutions matures originaires du monde de l'informatique (technologies de l'IT) depuis la démocratisation du Cloud Computing et les performances croissantes des processeurs banalisés. L'analogie peut être faite avec les smartphones qui regroupent les fonctions de plusieurs équipements : un seul objet peut remplir différentes fonctions telles que celles d'un téléphone, d'un appareil photo, d'une console de jeux, ou d'un podomètre, car elles sont réalisées par des logiciels². En découplant les fonctions (logicielles) de

¹ Dans les réseaux non-virtualisés actuels, un seul équipement peut parfois supporter plusieurs fonctions distinctes : par exemple, un CPE (« Customer-Premises Equipment ») est un routeur placé chez l'utilisateur (par exemple une entreprise) qui embarque également une fonction de pare-feu et des fonctions de qualité de service. Toutefois, la configuration demeure spécifique, rigide et difficilement reconfigurable à la volée.

² Dans certains cas, il a néanmoins été nécessaire d'ajouter de nouveaux composants au smartphone pour qu'il remplisse cette fonction (par exemple, un capteur photo).

l'équipement de son support matériel (hardware), la virtualisation permet d'acquérir indépendamment ces logiciels et de les installer sur des serveurs informatiques banalisés. Ces serveurs de grande capacité sont répartis sur quelques points de présence de l'opérateur³ (« data-centers »).

Le concept du NFV a été introduit en 2012 dans un Livre Blanc co-signé par 13 opérateurs, synthétisant les avantages de la virtualisation et invitant l'industrie à le développer pour le cadre des opérateurs télécoms. L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), à travers un groupe de travail dédié, a publié les spécifications d'un cadre commun permettant la mise en œuvre de la virtualisation des réseaux (cf. annexe 1 pour plus de détails sur la structure du NFV) dans un environnement multi-vendeurs⁴.

1.1.2 Les réseaux logiciels (SDN) : la programmation de l'acheminement du trafic

L'architecture d'un réseau est constituée d'un ensemble de liens et de nœuds interconnectés au moyen de routeurs distribués. Pour réaliser l'acheminement d'un flux de trafic entre deux points du réseau, les routeurs exécutent deux fonctions distinctes : signalisation (activation des algorithmes de routage) et transport (acheminement du trafic ou « forwarding »).

- La fonction de routage a pour objet de calculer, de sélectionner, d'établir et de maintenir le ou les chemins (également appelées routes) permettant d'acheminer le trafic entre des points du réseau. Elle mobilise un effort de calcul important afin d'établir la topologie du réseau et de calculer à chaque instant la route optimale au regard de critère(s) (appelé métrique de coût) tel que la minimisation du nombre de routeurs traversés ou le délai d'acheminement (appelé latence).
- La fonction de transport (« forwarding ») a pour objet l'acheminement effectif des flux de trafic en aiguillant, au niveau de chaque nœud du réseau, les données (appelée paquets) reçues via les interfaces d'entrée du routeur vers les interfaces de sortie appropriées du routeur, conformément à une table, dite table d'acheminement, alimentée par la fonction de routage.

Parallèlement au développement de la virtualisation des réseaux, se développent les réseaux programmés par logiciel (« Software-Defined Networks » ou « SDN ») qui permettent de relâcher, voire de s'affranchir de ces contraintes en programmant et en personnalisant par voie logicielle les règles d'acheminement de trafic (cf. annexe 2 pour plus de détails). Il y a donc séparation de la signalisation (intelligence) et de l'acheminement du trafic. En centralisant ainsi le pilotage du réseau (i.e. le calcul des routes, le réajustement des routes, l'instruction de règles de traitement spécifique selon les exigences du service) au niveau d'une intelligence de calcul logiquement centralisée (appelé le « contrôleur SDN ») et en distribuant l'intelligence (notamment, la connaissance topologique du voisinage), il devient possible de déployer une infrastructure composée de routeurs qui deviennent essentiellement des exécutants en charge d'acheminer le trafic. Ainsi le paradigme d'un réseau SDN se rapproche du concept de réseaux superposés (« overlay networks »).

Le pilotage en SDN étant centralisé, les administrateurs réseau peuvent répondre rapidement à l'évolution des besoins grâce à la remontée d'information (qui elle est décentralisée), en simplifiant l'allocation des ressources en fonction de la demande ; ils peuvent aussi facilement réorganiser le réseau (par exemple pour créer des réseaux privés virtuels, ou pour modifier automatiquement les politiques de routage en fonction du service utilisé). Cette centralisation de la prise de décision

³ L'architecture typique fait apparaître généralement un grand site principal (dans un rôle centralisateur) interconnecté en très haut débit à quelques sites secondaires plus excentrés.

⁴ L'adoption d'un cadre commun vise à s'affranchir des spécificités du modèle de chaque fournisseur et à permettre à l'utilisateur de cette technologie (ici les opérateurs) de s'outiller auprès de plusieurs vendeurs sur la même plateforme.

couplée à la décentralisation de l'intelligence rend la conception et le fonctionnement du réseau plus flexible et à terme moins coûteux.

1.2 Vers une « informatisation » du modèle technique traditionnel des télécoms

1.2.1 Combiner SDN et NFV permettrait une fertilisation croisée entre les deux technologies

Les technologies NFV et SDN se sont développées en parallèle et font partie d'une même transformation générale de l'industrie des télécommunications s'inspirant des mutations du domaine de l'informatique. NFV vise à rendre polyvalents les équipements physiques utilisés en leur permettant de multiplier les fonctions qu'ils peuvent remplir (chaque fonction devenant un logiciel plutôt qu'un équipement physique propre) ; SDN vise pour sa part à rendre programmables l'acheminement et le traitement de flux. Les deux technologies confèrent ainsi davantage de flexibilité et d'agilité opérationnelle et permettent aux opérateurs d'aller encore plus facilement au-delà de la simple fourniture de connectivité, en développant la fourniture de services. Au-delà des apports spécifiques de chacune de ces technologies, leur combinaison ouvre le champ à un enrichissement mutuel. En effet, une mise en œuvre efficace des principes du NFV suppose l'établissement automatique et flexible de réseaux virtuels reliant les différentes fonctions virtualisées, ce qui peut être fourni par un contrôleur SDN⁵. Inversement, établir les règles d'acheminement des flux via un contrôleur SDN nécessite des fonctions de réseau dont la réalisation sous une forme virtualisée pourrait apporter des avantages indéniables en termes de disponibilité, de flexibilité et de tenue en charge. Ainsi il est attendu qu'utilisateurs et développeurs de ces deux technologies cherchent à promouvoir leur combinaison.

1.2.2 Les effets de la virtualisation sur la qualité de service dans le cadre des télécoms

Le concept NFV tel que développé par l'ETSI définit un cadre architectural pour penser la virtualisation des fonctions de réseau ; néanmoins, il n'a pas vocation à spécifier les moyens techniques sollicités pour le mettre en œuvre.

La mise en œuvre de ces fonctions réseaux virtualisées⁶ peut être fait selon deux principales modalités techniques de virtualisation informatique, détaillées en annexe 1, chacune d'entre elles (dépendamment de l'implémentation de ces techniques) présentant des avantages et des inconvénients.

Dans un cas, une certaine latence est introduite, qui peut s'avérer incompatible avec des fonctions réseau ayant des contraintes strictes en latence, empêchant donc l'exploitation de ces fonctions à la volée.

Dans l'autre cas, la latence sera plus faiblement impactée, mais ce sont cette fois des risques liés à la volatilité qui sont susceptibles d'apparaître, c'est-à-dire une traçabilité plus complexe, un risque de défaillance plus distribué, une difficulté à orchestrer l'ensemble, etc.

Toutefois, quelle que soit la méthode de mise en œuvre de virtualisation retenue, le réseau pourra bénéficier d'un certain gain de fiabilité dans la mesure où le remplacement d'une fonction par une autre sera rendu relativement plus simple pour l'administrateur dans un modèle virtualisé, puisque,

⁵ Cette piste est notamment explorée par l'ETSI. Cf. ETSI GS NFV-EVE 005 V1.1.1 (2015-12): Network Functions Virtualization (NFV) Ecosystem; Report on SDN Usage in NFV Architectural Framework.

⁶ « Virtual Network Function » ou VNF.

grâce à l'orchestrateur⁷, les équipements défaillants sont presque immédiatement remplacés par d'autres équipements virtualisés en tous points identiques.

2 Ecosystème et chaîne de valeur

La virtualisation est susceptible d'avoir des effets importants sur les modèles d'affaire des équipementiers et des opérateurs.

2.1 Impact sur le marché des équipementiers

Pour les équipementiers, trois développements majeurs sont à anticiper du fait de la virtualisation : la modification des compétences métier, le changement de modèle économique (glissement vers des recettes variables plutôt que fixes), et l'importance croissante que le service après-vente est susceptible de prendre.

- De nombreux logiciels utilisés pour la virtualisation sont disponibles en *open-source* sous forme de composants logiciels qu'il est nécessaire d'assembler pour créer un équipement réseau virtualisé complet. Cependant, l'assemblage de ces composants, qui ne sont pas nécessairement optimisés pour fonctionner ensemble, requiert des compétences particulières.
- Certains équipementiers disposent de l'expertise nécessaire pour réaliser un tel assemblage et proposent des licences payantes « tout-en-un », permettant de déployer facilement des équipements réseau virtualisés sur du matériel générique. Ces licences doivent le plus souvent être périodiquement renouvelées. Cette approche impacte directement le modèle d'affaire des équipementiers et leur profil de revenu avec une diminution prévisible des revenus fixes et une augmentation des revenus variables.
- Que ce soit dans le cadre des offres « tout-en-un » ou des offres centrées sur les seuls équipements physique supports de la virtualisation, les équipementiers peuvent par ailleurs se démarquer en proposant de réaliser eux-mêmes l'intégration des différents équipements virtualisés et en fournissant des garanties (support et maintenance) avec une valeur ajoutée plus importante par rapport à ce qu'ils font actuellement avec leurs équipements dédiés du fait de l'accroissement de l'enjeu de l'intégration que pose l'éclatement et la multiplicité des fonctions virtualisées. À ce titre, certains acteurs du monde de l'informatique disposent d'une expertise dans ce domaine et sont susceptibles d'entrer en concurrence avec les équipementiers traditionnels. Ainsi, certains spécialistes de la virtualisation (comme VMWare ou RedHat) ont développé des versions « premium » et optimisées de leurs logiciels pour bénéficier des avantages de la virtualisation (flexibilité, mutualisation) tout en atténuant les inconvénients (diminution des performances, fiabilité amoindrie) qui y sont inhérentes (cf.1.2.2). Par ailleurs, les fournisseurs de cloud, disposent eux aussi d'une expertise en virtualisation et des ressources informatiques importantes et disposent aussi des compétences réseaux nécessaires au transport de larges volumes de données en un temps réduit.

2.2 Impact sur les opérateurs télécom

2.2.1 Impacts financiers

⁷ Cf. annexe 1

La virtualisation des réseaux permettra probablement de réaliser des gains financiers à terme. Toutefois l'ampleur et l'horizon de ces gains restent incertains et dépendants des situations propres et des scénarii retenus.

Les fournisseurs de solutions virtualisées estiment que la virtualisation permettra des gains considérables. Ainsi, selon une étude ACG de 2015⁸, la virtualisation pourrait permettre à un opérateur de réduire jusqu'à 2/3 de ses coûts d'investissement et d'exploitation liés aux équipements réseaux.

Cette estimation semble cependant maximaliste ; il convient de relativiser ces chiffres, étant donné que la partie virtualisable des réseaux ne représenterait, selon certains experts, que 25% du CAPEX annuel d'un opérateur mobile, les autres 75% concernant principalement des coûts provenant de l'investissement dans les sites radio et du foncier.

En outre, si le coût d'achat de l'équipement physique devrait diminuer significativement grâce à la virtualisation, le coût du logiciel utilisé pour mettre en œuvre la virtualisation est susceptible de varier fortement. Certains opérateurs pourraient intégrer les solutions *open-source* directement, mais ceux ne disposant pas des compétences ou de la ressource suffisante pour gérer l'intégration et l'adaptation de ces solutions, pourront préférer recourir à des licences d'équipementier afin de bénéficier de logiciels optimisés et plus facilement intégrables.

Dans les deux cas, on observerait un glissement d'un modèle de coûts fixes vers un modèle de coûts variables, qu'ils soient liés à une masse salariale plus qualifiée et chargée de traiter l'intégration et l'adaptation des briques logicielles dans le cas d'un recours à des solutions *open-source*, ou au paiement de licences dans le cas du recours aux solutions propriétaires payantes. La question du gain financier global peut alors se poser. À titre d'exemple, dans le cas d'un routeur virtualisé, au coût classique d'entretien d'un équipement s'ajouteraient donc des licences de logiciels dont les prix publics et à l'unité (et qui peuvent donc être différents de ceux pratiqués pour les opérateurs) varieraient autour de 8 000\$⁹ par an¹⁰. À titre de comparaison, l'achat d'un équipement équivalent non virtualisé coûterait environ 35 000\$¹¹ et ne nécessite pas de licence ; en fonction de la durée de vie relative des deux appareils, les économies de coûts d'investissement pourraient donc être compensées par le coût des licences. De plus, dans certains cas, il serait nécessaire de déployer plusieurs machines virtuelles pour fournir des performances similaires à celles d'un équipement dédié. Sur le moyen terme, les gains ne seront donc pas à la hauteur des prévisions d'ACG.

Les opérateurs pourraient vouloir combiner, au sein d'un même réseau, des VNF purement *open-source* avec des VNFs achetées à des équipementiers. Néanmoins, les garanties offertes par les équipementiers peuvent proscrire les déploiements mélangeant des VNFs provenant de différentes sources. Par conséquent, pour conserver les garanties sur les VNFs achetées aux équipements, les opérateurs pourraient être amenés à les séparer des VNFs purement *open-source*.

Plus généralement, la transition vers les réseaux virtualisés peut engendrer des coûts cachés, notamment en termes de formation, de consommation énergétique ou, dans certaines configurations, de consommation énergétique, même dans le cas d'un recours à des solutions propriétaires payantes.

⁸ Etude financée par VMware, "Total Cost of Ownership Study Virtualizing the Mobile Core" <https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/solutions/vmware-nfv-tco-report-acg.pdf>

⁹ Source : ITprice.com

¹⁰ Coûts pour un routeur 10Gbps, au-delà de ce débit, la consommation électrique serait trop importante sur les équipements virtualisés.

¹¹ Source : <http://itprice.com/cisco-gpl/1000v?p=>

2.2.2 Impacts opérationnels

En termes opérationnels, la virtualisation pourrait engendrer trois principaux défis pour les opérateurs : la requalification de leurs équipes, une possible dégradation de leur qualité de service, et la redéfinition des responsabilités contractuelles en cas de panne sur le réseau.

- Dans le monde de l'informatique, un ingénieur réseau peut administrer un grand nombre de machines (par exemple en moyenne 30 000 machines chez Google), alors que, chez les opérateurs, les ingénieurs administrent actuellement une centaine de machines ; au-delà du nombre de machines à gérer, la nature de ces machines est également très différente. Les opérateurs devront donc requalifier certains de leurs effectifs en administrateurs de réseaux virtualisés ; or, plusieurs experts ont souligné le fait que la formation de ces administrateurs n'est proposée par aucun cursus en France. La virtualisation du réseau des opérateurs passera donc par une période durant laquelle les opérateurs devront monter en compétence sur cette nouvelle technologie tout en gérant le parc non virtualisé. Si les opérateurs parviennent à acquérir les compétences nécessaires, certains pourraient chercher à développer eux-mêmes des logiciels de réseaux virtualisés, éventuellement en rejoignant une communauté open-source, afin d'être moins dépendants des équipementiers (c'est notamment une stratégie adoptée par AT&T¹²). Cela nécessiterait là encore un investissement significatif en termes de formation et d'organisation, mais cela leur permettrait d'une part de ne plus avoir à payer de licences, et d'autre part de développer des fonctions qui leurs seraient propres.
- De plus, la virtualisation pourrait poser question en termes d'effet sur la qualité de service des opérateurs (en termes de latence, de disponibilité ou de volatilité, selon le choix technologique retenu — cf. section 1.2.2). La question de l'ampleur de ces effets négatifs de la virtualisation sur la qualité de service est toutefois centrale pour déterminer si ceux-ci seront négligeables ou s'ils pourraient avoir un véritable impact sur la gestion opérationnelle des réseaux.
- Enfin, la virtualisation pose un problème nouveau concernant les responsabilités contractuelles. En effet, auparavant, pour les équipements dédiés (*switches, firewalls...*), l'équipementier était généralement le seul responsable contractuellement en cas de problème. Avec la virtualisation des fonctions de réseau, qui deviennent donc des applications s'exécutant sur des serveurs génériques, l'identification d'un responsable en cas de panne peut s'avérer difficile : est-ce l'opérateur lui-même, l'équipementier¹³, l'intégrateur, ou l'éditeur de logiciels ? Les garanties offertes par les équipementiers autoriseront-elles des configurations combinant des logiciels sous licences et des composants *open-source* directement intégrés ?

2.2.3 Impacts sur la fourniture de services

Grâce à la virtualisation, il sera possible, sur un même réseau physique, de créer des tranches de réseaux cloisonnées (« *network slicing* »), par exemple pour proposer des offres différenciées en terme de QoS à ses utilisateurs.

La virtualisation permet également aux opérateurs de partager avec des tiers (autre opérateur, utilisateur, entreprise, verticaux etc.) l'accès à leurs infrastructures réseau (cf. section 1.2.2) pour

¹² «Hitting the Open Road: Software-Accelerating Our Network with Open Source », <http://about.att.com/innovationblog/061714hittingtheopen>

¹³ Par exemple, en 2008, l'opérateur danois TDC a signé un partenariat stratégique avec l'équipementier Ericsson pour opérer et gérer son réseau afin d'accélérer la commercialisation de la 4G. Il n'est pas exclu qu'avec la virtualisation et les impacts opérationnels sur le métier de l'opérateur, de tels types de partenariats deviennent de plus en plus courants.

héberger des fonctions virtualisés, ces fonctions pouvant être fournies par l'opérateur (sous forme de catalogue) ou par les utilisateurs eux-mêmes comme par exemple des fonctions de pilotage ou monitoring de machines nécessaires à certaines industries ou cas d'usage pour verticaux (voiture connectée, smart city etc.).

Dans un scénario d'ouverture plus avancée, l'opérateur pourrait également techniquement offrir la possibilité à ses clients d'opérer leurs propres réseaux virtuels sur sa plateforme, soit en conservant une certaine maîtrise de l'intelligence de la plateforme (orchestration, contrôle, vision de bout-en-bout...), soit en se désengageant complètement de l'intelligence et en se confinant à un rôle d'opérateur d'infrastructure. Un fabricant de terminal (par exemple un constructeur de voitures connectées) pourrait ainsi gérer son propre réseau virtuel et y fournir les services associés.

Plusieurs opérateurs prévoient déjà de monétiser l'accès à certains équipements de leurs réseaux.

2.2.4 Impacts concurrentiels

La virtualisation pourrait permettre à de nouveaux opérateurs de lancer leur activité en s'appuyant sur un réseau entièrement virtualisé sans détenir d'infrastructures physiques en propre. Ces nouveaux opérateurs pourraient avoir des positionnements différents (marchés de niche ou marchés de masse) et des périmètres d'activités différents (opérateurs locaux, nationaux ou transnationaux).

En effet, un nouvel opérateur pourrait minimiser son investissement d'entrée en recourant à des solutions de cloud, ce qui réduirait son coût d'investissement. De plus, la gestion d'un réseau virtualisé nécessite des équipements différents et des effectifs humains avec une formation particulière. Les nouveaux entrants, qui pourraient directement recruter les profils et déployer les équipements les plus adéquats, pourraient donc bénéficier d'un avantage comparatif.

L'entrée sur les marchés des télécommunications pourrait donc être facilitée, notamment pour des acteurs disposant d'une expertise dans la virtualisation et le cloud, qui ne sont actuellement pas des acteurs présents sur ce marché ; ainsi, le paysage concurrentiel des télécommunications pourrait être profondément modifié.

Toutefois, si la virtualisation permet de simuler un réseau physique sans avoir besoin d'en être propriétaire, la nécessité d'obtenir un accord d'accès auprès de détenteurs d'infrastructures physiques demeure. Le degré d'accessibilité et la souplesse offerte par les détenteurs d'infrastructures physiques pourrait constituer un frein à ce développement. L'émergence de nouvelles offres grâce à la virtualisation, notamment d'offres transnationales, dépendra également du niveau d'homogénéisation des modalités d'accès.

3 Identification des problématiques et des enjeux pouvant mériter un focus dédié

3.1 Interopérabilité

Les technologies SDN et NFV permettent des architectures réseau fonctionnant grâce à plusieurs briques logicielles indépendantes et personnalisables. Ces briques peuvent être disponibles en *open-source*, ou développées en interne par certains des acteurs évoqués en section 2. Il serait souhaitable que ces « briques » puissent être utilisées sur la majorité des environnements, des infrastructures, et pouvoir communiquer entre elles : il s'agit d'une problématique d'interopérabilité.

Cet enjeu d'interopérabilité peut être appréhendé à deux niveaux : d'une part à l'intérieur d'un même réseau, et d'une autre part à la frontière de réseaux distincts (interconnexion).

- Au niveau d'un même réseau, l'interopérabilité entre les différentes composantes d'une architecture réseau reposant sur le SDN et la virtualisation permettrait d'éviter des

inefficacités (par exemple, le fait de devoir « personnaliser » une application réseau pour chaque socle de virtualisation). Ainsi, assurer cette interopérabilité, permettrait aux opérateurs d'acquérir des fonctions réseaux et les déployer dans leur infrastructure avec un minimum d'adaptation, ce qui leur permettra d'en réduire le délai et les coûts de mise en œuvre.

- Au niveau de la frontière entre réseaux distincts, l'interopérabilité sera nécessaire pour assurer une interconnexion de ces réseaux et garantir ainsi une qualité de service de bout en bout. Un point de vigilance concerne l'interopérabilité entre différents domaines SDN, notamment en ce qui concerne l'interopérabilité des différents orchestrateurs, qui ne fait pour l'instant objet d'aucune normalisation.

La programmabilité du réseau via des APIs et l'orchestration des fonctions virtualisées nécessitent la modélisation des configurations des équipements et des services réseaux virtualisés¹⁴. Cela a des conséquences pour les architectes réseaux qui doivent désormais modéliser ces services.

Des travaux de standardisation, menés notamment par l'industrie – par exemple au sein de l'ETSI ou d'organisations/consortiums ad-hoc¹⁵ – et le monde de l'open-source pourraient aider à répondre, techniquement parlant, à cette problématique d'interopérabilité. Pour garantir cette interopérabilité, il conviendra que les différentes organisations convergent, autant que possible, vers des standards communs ou, *a minima*, compatibles.

3.2 Accès des tiers aux infrastructures physiques : enjeux d'innovation, de concurrence et de préservation des capacités industrielles

Comme vu en section 2.2.3, la virtualisation offre un spectre de possibilités techniques pour les tiers sur les infrastructures ou plateformes des opérateurs.

Le degré d'exploitation de ce potentiel technique dépendra in fine du degré d'ouverture de l'opérateur vis-à-vis des tiers, qui peut aller de la simple proposition de catalogue de services virtualisés instanciés par l'opérateur lui-même jusqu'au cas où l'opérateur permet aux tiers qui le souhaitent l'instanciation et l'orchestration de leurs fonctions virtualisées.

Se pose donc la question des règles d'accès aux infrastructures physiques et du degré d'exposition des interfaces de programmation applicatives (API ou « Application Programming Interface ») aux tiers afin qu'ils puissent héberger leurs fonctions virtualisées ou paramétrer leur réseau virtualisé. Par ailleurs, la question des API pose une problématique concurrentielle dans le cas où un protocole ou une API seraient favorisés par des acteurs, de manière à exclure ceux qui ne les utiliseraient pas. Quel que soit le degré d'ouverture, il conviendra de rester vigilant quant aux problématiques de sécurité et de qualité de service de bout en bout.

Plus largement, la modification (ou non) des règles d'accès pourrait avoir des effets sur la dynamique concurrentielle et sur l'incitation à l'innovation. La question de la préservation des capacités industrielles des acteurs nationaux pourra également se poser.

¹⁴ Le langage de modélisation de données YANG (« Yet Another Next Generation », créé par un groupe de travail de l'IETF) est un exemple de langage de modélisation de ces configurations permettant de spécifier un modèle de service (en décrivant ses composants, ses interactions internes et externes, ses exigences et ses capacités) qui sera utilisé par l'orchestrateur/le contrôleur SDN mais également vis-à-vis à des tiers (exposition de ce service via des APIs).

¹⁵ Par exemple TIP (Telecommunication Infrastructure Project) consortium initié par Facebook, ou ONF (Open Network Foundation) consortium non lucratif initié par les opérateurs, des académiques et des acteurs OTT.

3.3 Neutralité de l'Internet et qualité de service différenciée

Comme vu précédemment, la virtualisation permet de mettre en œuvre le *network slicing*. Pour chaque *slice*, il est possible de configurer spécifiquement plusieurs paramètres de qualité de service dont bénéficieront les flux transportés. En outre, dans un réseau, le recours au SDN centralise et simplifie le paramétrage de la qualité de service pour chaque réseau, ce qui pourrait permettre de définir plus facilement des traitements spécifiques par type de flux.

Se pose alors la question de la conformité de ces fonctions au cadre réglementaire relatif à la neutralité de l'internet, ainsi que les modalités de contrôle du respect de cette obligation.

Dans ce contexte, le BEREC n'identifie pas à ce jour¹⁶ le *network slicing* comme une atteinte à la neutralité du net en tant que tel, dès lors qu'il est utilisé conformément aux possibilités de différenciation de qualité de service autorisées par le règlement européen sur l'internet ouvert (pour des services dits « spécialisés » par exemple, ou pour des pratiques de gestion de trafic raisonnables)¹⁷. Le BEREC précise par ailleurs qu'il revient aux autorités de régulation de déterminer au cas par cas si un service répond aux dispositions de l'article 3(5) du règlement internet ouvert, qui précise dans quelles conditions il est possible de proposer des optimisations pour les services spécialisés avec un niveau de qualité spécifique.

Pour contrôler les politiques de qualité de service implémentées au sein d'un réseau ayant recours au SDN, une première piste, relativement complexe à mettre en œuvre, pourrait être la consultation des fichiers de configuration au niveau du contrôleur et de l'orchestrateur, ainsi que la consultation des journaux d'événements réseau. Plus largement, se pose une problématique d'accès aux informations relatives au réseau pour des fins de contrôle du respect des obligations.

3.4 Sécurité

Les technologies SDN et NFV soulèvent quatre problématiques en termes de sécurité : création d'un point unique de défaillance due à la centralisation du contrôle des fonctions de réseau (« single point of failure », SPOF), nécessité de garantir l'étanchéité entre applications, augmentation des surfaces d'attaques, hétérogénéité des configurations.

- La centralisation du contrôle des fonctions de réseau constitue une vulnérabilité pour toute l'architecture : si cet élément est rendu indisponible ou dysfonctionnel, il n'est plus possible de gérer les réseaux dépendants de ce contrôleur (configuration, politique de routage...). Pour limiter le risque lié à la centralisation, il est possible de redonder les éléments critiques du réseau de manière à le rendre plus robuste. La virtualisation facilite le déploiement d'équipements redondés. Il s'agit plus particulièrement d'une problématique de robustesse et de fiabilité du réseau.
- La mutualisation des infrastructures permise par la virtualisation permet d'exécuter en parallèle des applications différentes sur une même machine physique : si les conditions de sécurité permettant de garantir l'étanchéité entre les applications s'exécutant simultanément ne sont pas réunies, alors l'effectivité de la mutualisation et les gains attendus pourraient être

¹⁶ Un groupe de travail concernant la mise à jour des lignes directrices du BEREC sur la neutralité du net a été mis en place pour l'année 2019.

¹⁷ « According to BEREC's current understanding and analysis, the Regulation seems to be leaving considerable room for the implementation of 5G technologies, such as network slicing, 5QI and Mobile Edge Computing. To date, BEREC is not aware of any concrete example given by stakeholders where the implementation of 5G technology as such would be impeded by the Regulation.» https://berec.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/berec/opinions/8317-berec-opinion-for-the-evaluation-of-the-application-of-regulation-eu-20152120-and-the-berec-net-neutrality-guidelines

limités par la nécessité de n'exécuter chacune des fonctions réseaux les plus critiques qu'isolément.

- Ces architectures se composent de plusieurs briques logicielles indépendantes, qui peuvent devoir communiquer entre elles : la multiplication des canaux de communication peut constituer une augmentation de la surface d'attaque et aboutir à d'éventuelles vulnérabilités supplémentaires.
- Les architectures NFV entraînent une très grande liberté dans la configuration des briques qui constituent le réseau. Cette liberté engendre d'une part une multiplication des sources d'erreurs potentielles et d'autre part une grande hétérogénéité des configurations, et donc une complexification de l'analyse de sécurité. Le nombre d'intervenants impliqués dans la configuration du réseau peut par ailleurs engendrer une dilution des responsabilités.

A contrario, il est possible que le recours au SDN permette une meilleure maîtrise des configurations et favorise la modification rapide de celles-ci. L'élaboration d'un cadre sécurisé propice au développement de la virtualisation fait partie des actions de l'ANSSI, identifiée notamment dans la revue stratégique de cybersécurité publiée en février 2018.

3.5 Souveraineté

La virtualisation des réseaux soulève deux enjeux au regard de la maîtrise de la souveraineté nationale : d'une part, l'obligation pour les opérateurs de localiser sur le territoire national certaines de leur activités et, d'autre part, l'obligation de soumettre à autorisation l'exploitation de certains dispositifs techniques.

- La virtualisation permet aux opérateurs de s'affranchir des contraintes géographiques pour la réalisation de certaines fonctions relevant du cœur de réseaux, de son exploitation ou de sa supervision. Ainsi certains opérateurs français pourraient choisir de réaliser certaines de ces activités en dehors du territoire national, soit pour des raisons de coût, soit pour les mutualiser avec les activités similaires de filiales ou de sociétés sœurs exerçant dans d'autres pays. Or, la réglementation prévoit spécifiquement que certaines activités, notamment la mise en place et la mise en œuvre des moyens nécessaires aux interceptions de correspondances¹⁸, aient lieu sur le territoire national. La délocalisation de certaines fonctions à l'étranger, facilitée par la virtualisation, peut également avoir un impact sur la capacité de l'Etat à mettre en œuvre ses capacités en matière de détection de cyberattaques ou de réaction en cas de crise. Le fait que des fonctions historiquement internalisées par les opérateurs puissent être externalisées auprès de fournisseurs externes peut également avoir des impacts en termes de souveraineté lorsque, par exemple, ces acteurs sont assujettis à des réglementations étrangères (par exemple le Cloud Act¹⁹).
- Dans le cadre juridique actuel²⁰, les dispositifs techniques de nature à permettre les interceptions sont soumis à autorisation du Premier ministre. Or, dès lors que des fonctions réseaux, soumises au régime d'autorisation susmentionné, sont virtualisées, se pose la question de savoir précisément quels éléments doivent obtenir cette autorisation. S'agit-il uniquement de la fonction virtualisée en elle-même ou faut-il également obtenir une autorisation pour l'infrastructure du cloud, machines physiques et systèmes d'exploitation, susceptible d'exécuter les fonctions virtualisées pour lesquelles une autorisation est requise ?

¹⁸ Article D. 98-7 III du CPCE

¹⁹ <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/2383/text>

²⁰ C.f. L'article R.226-3 du code pénal et l'arrêté du 11 août 2016 modifiant l'arrêté du 4 juillet 2012 fixant la liste d'appareils et de dispositifs techniques prévue par l'article 226-3 du code pénal.

La prise en compte de ces contraintes régaliennes par les opérateurs, voire de leurs évolutions, sont déterminantes pour leur permettre de définir précisément la place que devra prendre la virtualisation dans leurs futurs réseaux et, par conséquent, les gains qu'ils pourront en retirer.

Là encore, ces questions de souveraineté relèvent davantage des compétences notamment du Gouvernement (ANSSI et SGDSN entre autres).

Annexe 1

Spécifications historiques de la virtualisation

Le concept du NFV a été introduit en 2012 dans un Livre Blanc²¹ co-signé par 13 opérateurs, synthétisant les avantages de la virtualisation et invitant l'industrie à le développer pour le cadre des opérateurs télécoms. L'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), à travers un groupe de travail dédié, a publié les spécifications d'un modèle permettant la mise en œuvre de la virtualisation des réseaux dans un environnement multi-vendeurs. Dans sa version simplifiée, le modèle NFV de l'ETSI est structuré autour de 3 blocs principaux :

- l'infrastructure NFV, une infrastructure générique sous forme de serveurs, commutateurs, base de données etc. et agnostique par rapport aux applications qu'elle supporte ;
- les fonctions réseaux virtualisées (« Virtual Network Function » ou VNF), qui en s'inspirant des avancées de la mise en œuvre de la virtualisation dans le domaine de l'IT, sont instanciées à la volée sur l'infrastructure NFV ;
- l'« orchestrateur » ou « contrôleur » (« *Management and Orchestration* » ou MANO), qui prend en charge le contrôle et la gestion de ces VNF (gestion de cycle de vie, contrôle de leur élasticité, choix du serveur physique sur lequel exécuter tel ou tel VNF etc.). L'orchestrateur pilote le comportement des VNF à travers une série de descripteurs (fichiers spécifiques) fournis par le vendeur, contenant leurs caractéristiques, des instructions décrivant les ressources matérielles requises pour les déployer à travers le VIM (« Virtual Infrastructure Manager ») (type et débit de connectivité interne/externe, capacité de calcul/stockage etc.) et les conditions contraignant leur assemblage avec d'autres VNF. En somme, l'orchestrateur demeure le garant d'une composition et d'une orchestration des VNF à travers une vision du service de bout en bout.

Les premières propositions de mise en œuvre de VNF se basent sur des machines virtuelles, ou « *virtual machines* » (VM) ; il s'agit de partitions de la ressource physique (l'infrastructure) cloisonnées par une couche logicielle spécifique où chaque machine virtuelle embarque le logiciel de la fonction réseau à virtualiser. Grâce à ce partitionnement, il est possible de permettre à plusieurs opérateurs de contrôler des machines virtuelles qui sont déployées sur une même machine physique. Néanmoins, ces machines virtuelles intègrent leurs propres systèmes d'exploitation et ne permettent généralement pas un accès direct à la ressource physique. Ces contraintes font que les machines virtuelles sont légèrement moins réactives que les machines physiques qu'elles émulent. Si cette légère latence causée par la virtualisation n'est pas problématique dans l'usage d'un ordinateur classique, elle est incompatible avec certaines fonctions réseau requérant des contraintes strictes de latence et empêche donc d'exploiter ces fonctions à la volée. Ainsi des propositions alternatives plaident pour l'utilisation de « conteneurs », une variante miniature de la machine virtuelle qui s'appuie sur une isolation moins étanche entre la machine virtuelle et l'infrastructure physique. Les conteneurs sont plus réactifs que les machines virtuelles et leur usage est plus mature dans l'industrie des plateformes cloud à base de web-services²² et de micro-services (Cloud natif), mais aussi plus volatiles²³.

²¹ *Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action*. White Paper publié au la conférence "SDN and Openflow World Congress" (2012)

²² Ce sont les briques de base constituant des applications de type Facebook, les messageries Gmail, applications Amazon etc.

²³ La volatilité est liée à la granularité d'un container. Contrairement à une machine virtuelle, le container est un micro composant, ce qui induit des risques spécifiques : traçabilité plus complexe, risque de défaillance plus distribué, complexité pour coordonner et orchestrer l'ensemble etc.

Annexe 2

SDN

Pour réaliser leurs fonctions de routage des flux de trafic, les routeurs mobilisent un effort de signalisation et un calcul important (notamment pour la découverte des équipements voisins, le calcul de la route optimale, l'exécution de certaines tâches spécifiques (comme l'inspection des paquets, le filtrage, le partage de charge etc.) intégrées aux tâches standards d'acheminement et de transfert des paquets) et requièrent souvent une programmation statique des règles de gestion de trafic. Les réseaux programmés par logiciel (SDN) permettent de relâcher voire de s'affranchir de ces contraintes en programmant et en personnalisant par voie logicielle les règles de routage et de gestion de trafic en fonction des contraintes/objectifs du service.

Cette programmation par voie logicielle est possible grâce à la dissociation de la couche de transmission/traitement de flux de données (« Data Flow ») et de la couche de contrôle/signalisation (« Control Plane ») habituellement intégrée dans le même équipement. Cette séparation a été formulée par une recommandation de l'ITU-T et théorisée par l'ONF²⁴ en 2014 à travers un modèle architectural en 3 couches distinctes qui interagissent à travers des interfaces de programmation applicative (API²⁵): la couche logicielle (comprenant les applications de l'utilisateur final qui utilisent le réseau SDN), la couche de contrôle (fournissant la fonction de contrôle centralisée qui supervise et agit sur le comportement de transfert de réseau, elle se matérialise sous forme de « contrôleur SDN ») et la couche infrastructure (comprenant l'ensemble des équipements de réseau en charge d'exécuter les commandes de commutation et de transfert des paquets telles que instruites par le contrôleur SDN).

SDN permet de gérer le plan de transfert à partir d'un contrôleur logiquement centralisé, ce qui rend les opérations et la gestion du réseau très flexibles. L'architecture en couches avec des API bien documentées entre les couches fournit une indépendance par rapport aux fournisseurs, évitant ainsi de verrouiller l'opérateur de réseau dans une logique (technique et donc commerciale) spécifique à un équipementier.

²⁴ Open Network Foundation (ONF), SDN Architecture (06/2014)

²⁵ Application Programming Interface (API) qui joue le rôle de façade clairement délimitée permettant à une entité logicielle de communiquer avec une autre entité. Développées massivement dans le monde de l'informatique pour faciliter la création d'applications ou de services logiciels, les API sont mises en œuvre souvent sous forme de bibliothèques logicielles (développées en Open Source ou propriétaires) et présentent l'intérêt de masquer par l'abstraction les éléments techniques spécifiques au fonctionnement interne de l'entité et ainsi jouer un rôle clef pour favoriser l'interopérabilité.

Annexe 3

Auditions et Bibliographie

Auditions

Un cycle d'auditions a nourri notre réflexion sur la virtualisation des réseaux. Pour autant, les positions prises dans cette note ne reflètent pas nécessairement les points de vues des personnes auditionnées ni des institutions auxquelles elles appartiennent.

Ont notamment été auditionnés :

Patrice Nivaggioli, Eric Hamel, Jérôme Tollet et Bruno Bernard, **CISCO**

Stefano Secci, Professeur au **CNAM**

Davy Letailleur et Francois-Xavier Godron, **Orange**

Philippe Martins, Professeur à **Télécom ParisTech**

Jean-Louis Rougier, Professeur à **Télécom ParisTech**

Bibliographies

- ETSI, *Network Functions Virtualisation: Introductory white paper*
https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf
<https://www.etsi.org/technologies/nfv>
- AT&T, *AT&T Vision Alignment Challenge Technology Survey, AT&T Domain 2.0 Vision White Paper*, November 13, 2013.
- Martin Taylor, *The application of Cloud Native design principles to network function virtualization*, Metaswitch.
- Bruno Chatras, *La virtualisation des fonctions de réseaux de télécommunication*, Revue Telecom n°181, mai 2017.
- 5G-PPP Software Network Working Group, *From Webscale to Telco, the Cloud Native Journey*, Cloud Native White Paper, July 2018
- Commission Européenne, *Implications of the emerging technologies Software-Defined Networking and Network Function Virtualisation on the future Telecommunications Landscape (SMART 2005/0011)*, 2016
http://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=44557
- ORECE, *Input paper on Potential Regulatory Implications of Software-Defined Networking and Network Functions Virtualisation (BoR (16) 97)*, 2016
https://bereg.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/bereg/download/0/6088-input-paper-on-potential-regulatory-impl_0.pdf
- IDATE Digiworld Research, *Virtualization in Telco Networks: which markets for SDN and NFV, and what perspectives with network slicing for 5G?*, September 2017
- *SDN and NFV Simplified: A visual guide to understanding Software Defined Networks and Network Function Virtualization*", Jim Doherty, 2016 Pearson Education.
- Diego Kreutz, Fernando M. V. Ramos, Paulo Verissimo, Christian Esteve Rothenberg, Siamak Azodolmolky, Steve Uhlig, *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey*, IEEE Surveys & Tutorials on communications.

Réseaux du futur

Note n°2 Les voitures connectées

19 février 2019

L'émergence de nouveaux services de mobilité laisse supposer des besoins croissants de connectivité. Pour y répondre, différentes technologies existent, s'appuyant sur différents réseaux. La présente note se concentre sur les Systèmes de Transport Intelligents (STI) routiers, et plus précisément les voitures connectées, pour comprendre quelles stratégies de connectivité existent et quels impacts peuvent en être attendus, tant sur les réseaux que sur le secteur automobile.

Synthèse

La connexion de l'infrastructure routière aux véhicules et des véhicules entre eux ouvre la voie à de nombreuses applications. Les messages peuvent être générés automatiquement par les véhicules à partir de leurs capteurs embarqués (route glissante, freinage d'urgence...) ou transmis par les gestionnaires d'infrastructures routières (chantiers, viabilité hivernale, conditions de trafic...). Ils peuvent être échangés « directement », via des communications de courte portée dans la bande de fréquences des 5,9 GHz, ou via le réseau cellulaire des opérateurs mobiles, sur de plus longue portée, via les bandes de fréquences qui ont été attribuées à ces opérateurs. L'un des enjeux principaux consiste en la mise en place d'un écosystème fédérateur entre les véhicules, les réseaux de télécommunication et les réseaux routiers, qui ouvrira la voie à des cas d'usages variés, dans le domaine de la sécurité routière, de l'efficacité du trafic, de la protection environnementale ou du confort des conducteurs.

Malgré les promesses offertes par les véhicules connectés, il existe aujourd'hui plusieurs barrières qui freinent leur déploiement :

- les technologies de communication qui équiperont ces véhicules ne sont pas encore arrêtées, et il existe aujourd'hui une bataille intense entre les acteurs du secteur (notamment les constructeurs automobiles) pour imposer leur standard parmi les deux technologies rivales, qui sont l'ITS-G5 et le C-V2X ;
- les modèles économiques associés ne sont pas clairement identifiés, en particulier en ce qui concerne le déploiement des unités de bord de route, utilisées par les gestionnaires d'infrastructures pour communiquer avec les véhicules ;
- la difficulté à garantir une réelle fiabilité de la communication sur une large part des réseaux routiers, pourtant critique pour les cas d'usages liés à la sécurité routière.

Enfin, il faut signaler qu'au-delà des technologies basées sur une connectivité intégrée dans les véhicules, d'autres modèles, basés sur une connectivité apportée par le smartphone de l'utilisateur, sont susceptibles d'émerger et d'apporter des applications innovantes à un rythme rapide.

1. Les STI routiers

1. Véhicules connectés et autonomes

Les systèmes de transport intelligents se conçoivent comme un écosystème permettant, grâce aux technologies numériques, de collecter, traiter et diffuser l'information liée aux transports. Ils créent ainsi un lien de communication entre les différentes couches du domaine que sont les infrastructures, le ou les véhicules, et l'utilisateur. De nombreux usages sont permis grâce à ces systèmes, notamment les assistants à la conduite, les véhicules connectés et autonomes.

Le terme « véhicule **connecté** » recouvre non seulement une diversité de connexions mais également d'applications et de services. Ce type de véhicules n'est pas seulement connecté à un réseau (*Vehicule to Network*, ou V2N) permettant d'offrir des services au sein de l'habitacle tels que des informations sur le trafic en temps réel par exemple ; ils sont également en mesure d'échanger des informations avec d'autres véhicules (V2V), avec les infrastructures (V2I), ou encore, avec les piétons (V2P).

Au-delà de leur connectivité, certains véhicules peuvent intégrer des niveaux plus ou moins importants d'aide à la conduite. A l'extrême, on appelle véhicules **autonomes** les véhicules aptes à rouler sans intervention du conducteur dans certaines configurations.

2. Différents cas d'usage

Des véhicules de ce type, connectés ou autonomes, sont d'ores et déjà en service, l'évolution vers plus de connectivité et d'autonomie faisant dès aujourd'hui partie des arguments de vente et de différenciation des produits. En effet, les véhicules peuvent être déjà partiellement connectés : information sur le trafic en temps réel, Bluetooth, etc. De même, certains véhicules proposent parmi leurs options une assistance à la conduite, comme la réalisation de certaines manœuvres tels que des créneaux ou le freinage d'urgence sans intervention du conducteur.

Les domaines d'applications et de cas d'usages sont nombreux : il apparaît que les questions de sécurité routière, d'efficacité du trafic, de protection environnementale et de confort des conducteurs sont au cœur des vellétés dans le domaine du véhicule connecté. Les pistes les plus avancées semblent par ailleurs porter sur les camions ou encore les flottes de véhicules.

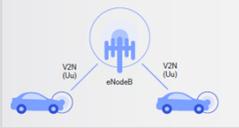
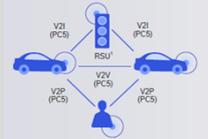
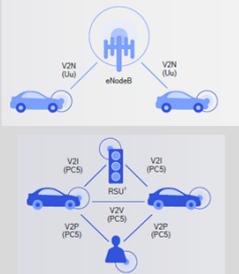
2. Les solutions technologiques existantes

La connectivité croissante des véhicules pose la question des technologies qui seront employées pour opérer cette connectivité, et de leurs impacts potentiels sur les réseaux de communication et leur infrastructure. Afin d'évaluer ces implications, il convient au préalable de distinguer les deux principaux modes de communication qui permettent aux véhicules connectés d'échanger des informations :

- Les communications dites « directes », de courte portée, qui utilisent la bande de fréquence des 5,9 GHz ;
- Les communications de longue portée, qui utilisent les réseaux cellulaires des opérateurs mobiles, dans les bandes de fréquences qui leur ont été attribuées.

Les modes de communication en bande 5,9 GHz ou au moyen des réseaux des opérateurs mobiles peuvent être présents séparément ou simultanément sur un véhicule. Ainsi, plusieurs stratégies de connectivité peuvent exister :

Tableau 1 : stratégies de connectivité

	Bandes des opérateurs mobiles	Bande 5,9 GHz	Bande des opérateurs mobiles + bande 5,9 GHz
Technologies	2G, 3G, 4G, bientôt 5G	ITS-G5 (dérivé du Wi-Fi)	C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)
Mode de communication	Vehicle-to-Network 	Vehicle-to-Vehicle Vehicle-to-Infrastructure Vehicle-to-Pedestrian 	Vehicle-to-Network Vehicle-to-Vehicle Vehicle-to-Infrastructure Vehicle-to-Pedestrian 

Source des schémas : Qualcomm

Il convient de signaler que le déploiement des réseaux dans les bandes des opérateurs mobiles et dans la bande 5,9 GHz ne sera pas nécessairement réalisé par les mêmes acteurs.

1. Les communications directes dans la bande des 5,9 GHz

S'agissant des fréquences, les véhicules connectés peuvent utiliser pour les communications directes la bande 5875 - 5905 MHz (ou « bande 5,9 GHz »), qui a été désignée de manière harmonisée au niveau européen par la décision 2008/671/CE.

Le régime d'utilisation de la bande 5,9 GHz est un régime d'autorisation générale, ou « bande libre », réservée aux STI routiers. Cette bande de fréquences est ainsi utilisable par tous les STI routiers gratuitement, sans déclaration préalable ni demande d'autorisation, sous réserve de respecter les conditions techniques d'utilisation de la bande définies au niveau européen.

Performances et cas d'usage

Les communications directes dans la bande des 5,9 GHz se caractérisent par :

- une portée de l'ordre du kilomètre pour les communications V2I, de l'ordre de 500 mètres pour les communications V2V ;
- des latences relativement faibles, de l'ordre de la dizaine de milliseconde ;
- des débits relativement faibles, du fait de la faible largeur de bande disponible ;
- l'absence de garantie de non brouillage.

Ces performances peuvent toutefois varier significativement en fonction de la présence d'obstacles le long du trajet de l'onde (en milieu urbain notamment) et de la densité de véhicules utilisant la bande au même moment.

Les communications directes en bande 5,9 GHz ne sont pas limitées aux seules communications entre véhicules (V2V), elles peuvent aussi avoir lieu avec l'infrastructure routière (V2I) *via* des unités de bord de route (UBR)¹. Ces UBR peuvent être déployées en des points précis de la voirie, en particulier en des points réputés dangereux, afin de prévenir le véhicule connecté et limiter les risques d'accident.

Les communications directes en bande 5,9 GHz sont utilisées pour fournir aux conducteurs des informations supplémentaires sur les autres véhicules, l'état du trafic et l'environnement routier. Ces informations viennent compléter celles détectées par le véhicule grâce à ses capteurs propres (radars, caméras, lidars) et peuvent être exploitées par les algorithmes de la voiture pour améliorer la sécurité routière, optimiser les services d'aides à la conduite, et à terme offrir de plus hauts niveaux d'autonomie.

Technologies utilisées dans la bande

Les conditions d'utilisation de la bande des 5,9 GHz étant neutres technologiquement, toute technologie peut y être utilisée dès lors qu'elle respecte les conditions techniques d'utilisation harmonisées.

En pratique, il existe aujourd'hui deux principales technologies capables d'utiliser la bande 5,9 GHz :

- L'ITS-G5 (*Intelligent Transport System - G5*)
- Le C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*)

L'ITS-G5 est une technologie mature, dérivée du WiFi. Plusieurs projets pilotes à grande échelle ont déjà été réalisés avec cette technologie, notamment le pilote SCOOP, qui vise à déployer 3 000 véhicules sur 2 000 km de routes répartis en cinq sites : Ile-de-France, A4, Isère, rocade de Bordeaux et Bretagne. Cette technologie est conçue pour fonctionner uniquement en bande 5,9 GHz. La notion de maturité doit toutefois être considérée avec prudence dans la mesure où peu de tests avec une densité significative de véhicules ont été réalisés et documentés.

Le C-V2X est une technologie plus récente, définie par le 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Cette technologie peut utiliser la bande 5,9 GHz pour des communications directes, ainsi que le réseau cellulaire des opérateurs mobiles pour communiquer avec les véhicules (notamment les fréquences basses qui permettent des couvertures plus étendues que la bande 5,9 GHz) (cf. ci-dessous)). Le C-V2X est basé aujourd'hui sur la technologie LTE aussi bien pour les communications directes en bande 5,9 GHz que pour les communications cellulaires (on parle de « LTE-V2X ») ; à terme, le C-V2X devrait évoluer pour intégrer la 5G (« 5G-V2X »), et ainsi bénéficier des avancées de performance associées (débit, latence, fiabilité).

Ces deux technologies ne sont aujourd'hui pas interopérables, c'est-à-dire qu'un véhicule équipé d'une technologie ne pourra pas communiquer avec un véhicule équipé de l'autre technologie. Des travaux sont actuellement en cours pour rendre l'ITS-G5 et le C-V2X interopérables et traiter la question de leur coexistence radio dans la même bande de fréquences.

¹ Pour permettre par exemple aux gestionnaires d'infrastructures routières de transmettre des informations aux véhicules (types : chantiers...)

Travaux en cours et annonces de déploiement

Au niveau européen, la directive 2010/40/EU (article 7) prévoit que la Commission européenne doit définir les spécifications nécessaires pour assurer la compatibilité, l'interopérabilité et la continuité en vue du déploiement et de l'utilisation opérationnelle des STI dans l'Union européenne. Un projet d'acte délégué visant à définir ces spécifications est actuellement en cours de préparation par la Commission. Dans sa rédaction actuelle (au 14 janvier 2019), l'acte délégué autorise le déploiement de la technologie ITS-G5, qui est la plus mature, et prévoit un processus pour permettre l'arrivée d'autres technologies (comme le C-V2X) dans un délai rapide, dès lors que celles-ci sont techniquement matures et capables d'assurer la compatibilité et l'interopérabilité avec les technologies déjà mises en places (ou de définir un chemin de migration convenable). Des travaux sont également en cours au niveau de la CEPT (Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications) et à l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) pour traiter la question de la coexistence des technologies ITS-G5 et C-V2X dans la même bande de fréquences.

Au niveau national, la stratégie du développement du véhicule autonome², publiée en mai 2018 par le ministère des transports, prévoit la préparation d'un plan de déploiement de la connectivité des infrastructures. En parallèle, un groupe de travail regroupant plusieurs acteurs institutionnels (ministère chargé des transports, ministère chargé de l'économie, Arcep) et industriels (constructeurs automobiles, opérateurs mobiles, gestionnaire d'autoroutes...) s'est réuni courant 2018 et a produit un rapport comparant les solutions technologiques disponibles et la pertinence socio-économique de la couverture de différentes sections-types du réseau routier. Les suites données par le gouvernement à ce rapport ne sont pas connues pour le moment.

Sans attendre la stabilisation du cadre réglementaire, certains constructeurs automobiles ont d'ores-et-déjà annoncé leur intention de lancer sur le marché leurs véhicules connectés avec l'une ou l'autre de ces technologies, dont notamment :

- En ITS-G5 : Volkswagen³ (déploiement dans les nouveaux véhicules à partir de 2019), Renault
- En C-V2X : PSA⁴ (à partir de 2020), Ford⁵ (pour ses véhicules aux Etats-Unis, à partir de 2022), BMW

Quelques éléments de comparaison internationale peuvent être donnés :

- Le Japon a débuté en 2011 le déploiement d'UBR pour permettre des services I2V selon la technologie DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*, équivalent de l'ITS-G5) opérant dans la bande des 5,8 GHz. Pour les services V2V, un autre système est actuellement en cours de test, dans la bande des 760 MHz.

² <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/quelle-strategie-developpement-du-vehicule-autonome-en-france>

³ Communiqué de presse : <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-group-assumes-pioneering-role-in-rapid-road-safety-improvement-541>

⁴ Communiqué de presse : <https://www.groupe-psa.com/fr/actualites/corporate/le-groupe-psa-accelere-dans-le-deploiement-des-vehicules-connectes/>

⁵ Communiqué de presse : <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/01/09/qualcomm-and-ford-collaborate-c-v2x-global-initiative-improve-vehicle>

- En Chine, la bande 5905 - 5925 MHz est réservée pour la technologie C-V2X depuis octobre 2018.
- Aux Etats-Unis, la bande 5850 - 5925 MHz est réservée pour le DSRC. Le C-V2X peut toutefois y avoir accès à titre expérimental dans des zones géographiques bien définies.
- La Corée du Sud a achevé fin 2017 un projet pilote de services I2V, V2I et V2V sur un tronçon autoroutier de 88 km, basé sur la technologie DSRC, opérant dans la bande 5855 - 5925 MHz.
- Enfin, l'Autriche et sa compagnie autoroutière nationale ASFINAG ont annoncé en septembre 2018 le lancement d'un appel d'offres pour l'équipement du réseau autoroutier en ITS-G5.

Enfin, il faut signaler que la disponibilité des puces utilisées pour la technologie C-V2X pourra constituer un enjeu de souveraineté, dans la mesure où le nombre d'entreprises proposant ces puces est aujourd'hui très limité (il devrait toutefois croître au fur et à mesure que le marché des véhicules connectés se développe).

Positionnement des acteurs interrogés sur le choix entre ces deux technologies

Comme leurs différentes annonces le montrent, les constructeurs automobiles ne sont pas unanimes quant à leur préférence pour l'une ou l'autre technologie. Parmi les constructeurs interrogés, certains sont en faveur de l'ITS-G5, et estiment essentiel que les technologies déployées soient interopérables, pour permettre un taux de pénétration suffisant dans le parc de véhicules en circulation : pour ces acteurs, il est donc impératif que le C-V2X soit rétro-compatible avec l'ITS-G5, qui sera déployé en premier.

D'autres constructeurs, en faveur du C-V2X, mettent en avant les économies d'échelles permises par cette technologie : les véhicules étant produits à l'échelle mondiale, ces constructeurs privilégient un alignement avec la Chine, qui a fait le choix du C-V2X. Ces acteurs jugent également le C-V2X intrinsèquement plus performant que l'ITS-G5, et expliquent le choix de l'ITS-G5 par leurs concurrents comme le résultat d'un verrouillage technologique (les investissements initiaux menés par ces industriels les lieraient aujourd'hui à l'ITS-G5). Pour ces acteurs, le débat technologique est jugé regrettable dans la mesure où il génère de nombreuses incertitudes qui ralentissent le déploiement des technologies et des infrastructures de long des routes.

Du côté des opérateurs mobiles, un premier acteur considère que le C-V2X sera probablement plus performant à terme : en effet, sa capacité à faire appel à un serveur dans le réseau permet d'optimiser, de manière centralisée, l'utilisation du spectre de la bande 5,9 GHz. Cette possibilité n'existe pas en ITS-G5. Cet acteur souligne toutefois que le C-V2X n'est actuellement pas assez mature, ce qui ne permet pas de vérifier les performances annoncées. Selon un second acteur, les communications cellulaires et les communications directes V2V ont toutes deux de l'intérêt et seront complémentaires, les communications directes pouvant servir à prendre le relai dans les zones blanches des réseaux mobiles. Dans l'ensemble, les opérateurs mobiles interrogés indiquent ne pas souhaiter prendre position en faveur de l'une ou l'autre technologie et considèrent que les deux doivent pouvoir être envisagées.

Il convient de souligner que la position de neutralité technologique implique que les deux technologies en compétition doivent avoir les mêmes chances de déploiement d'un point de vue réglementaire : par conséquent, leurs adaptations (dont la faisabilité n'est pas confirmée et en cours d'évaluation) devraient être équitablement supportées, compte tenu de leur niveau de déploiement commercial actuel.

Enfin, un équipementier interrogé, se déclare en faveur de l'ITS-G5. Cet acteur juge en effet essentiel de pouvoir établir des communications directes avec les utilisateurs, qui ne soient pas tributaires du

réseau des opérateurs mobiles : la capacité du C-V2X à utiliser les réseaux mobiles présente donc, selon cet acteur, peu d'intérêt. Cet équipementier met également en avant le recul important disponible sur l'ITS-G5, qui permet d'évaluer de façon fiable les performances de cette technologie, à l'inverse du C-V2X.

Toutefois, pour de nombreux acteurs, le critère de choix n'est pas tant la performance de chacune de ces deux technologies, que l'existence d'un écosystème. Pour l'un des constructeurs interrogés, l'écosystème 5G et donc C-V2X sera plus actif et plus dynamique que l'écosystème ITS-G5. A l'inverse, un opérateur télécom rappelle que l'écosystème C-V2X est pour l'instant balbutiant et que la technologie manque encore de maturité.

Tandis que les premiers déploiements adoptaient davantage la technologie ITS-G5, les récentes annonces laissent supposer que de plus en plus d'industriels tendent à adopter le C-V2X, ce qui pose la question de la stabilité des positions. Dans ce contexte, l'enjeu pour le régulateur est de parvenir à éclairer un débat technologique complexe, et de contribuer à la définition d'un cadre réglementaire à même de lever les incertitudes qui freinent aujourd'hui les acteurs automobiles, tout en veillant à éviter le risque de verrouillage technologique.

Modalités de déploiement des infrastructures en bord de route

Il existe actuellement beaucoup d'incertitudes sur les modalités de déploiement des UBR. Leur coût unitaire étant estimé à environ 3 000 € (pour une couverture de 2 km), leur déploiement entraînerait des investissements très élevés, ne serait-ce que pour la couverture des réseaux autoroutiers, même si leur densité linéaire est optimisée pour couvrir exclusivement les zones à risque⁶ :

- Tout d'abord, il existe une incertitude sur l'intérêt socio-économique d'un tel déploiement, du point de vue de la collectivité : les premiers résultats de l'analyse coût-bénéfice sur ce sujet, menée par le ministère des transports, peuvent être positifs sous certaines hypothèses ;
- Ensuite, il existe une incertitude sur les modèles économiques qui permettraient à des acteurs privés de procéder à un investissement dans des UBR, les sources de revenus n'étant pas clairement identifiées aujourd'hui.

Au total, il est difficile de prédire quel pourrait être l'acteur en charge de leur déploiement : Etat, collectivités territoriales, gestionnaires autoroutiers, acteurs privés...

2. Les communications cellulaires, *via* les réseaux des opérateurs mobiles

Les véhicules connectés peuvent également utiliser les réseaux des opérateurs mobiles (encore appelés « réseaux cellulaires ») pour se connecter à l'Internet général et échanger des informations. Cela nécessite que les véhicules soient équipés d'une carte SIM, qu'ils disposent d'un contrat avec les opérateurs mobiles pour l'utilisation de leur réseau, et que les axes de circulation bénéficient d'une couverture mobile.

Contrairement au cas de la bande 5,9 GHz, les réseaux mobiles utilisent différentes bandes de fréquences attribuées par l'Arcep, sous un régime d'autorisation individuelle.

⁶ Charges auxquelles s'ajoutent les frais d'exploitation de ces infrastructures, dont les estimations sont encore très variables

L'accès des véhicules au réseau cellulaire permet, par rapport aux possibilités offertes sur la bande 5,9 GHz :

- d'accéder à des débits plus élevés, ouvrant la voie à davantage de services⁷ ;
- des communications sur de plus longues distances entre les véhicules ;
- une garantie de non brouillage, qui se traduit en pratique par la possibilité, en cas de brouillage constaté, de déclencher une procédure visant à faire cesser le brouilleur.

L'accès des véhicules au réseau cellulaire permet, par ailleurs, de bénéficier des avancées technologiques des réseaux des opérateurs mobiles, et notamment de l'arrivée de la 5G (la cinquième génération de réseaux mobiles), sous réserve que les capacités de connectivité des véhicules évoluent au même rythme que celles des réseaux mobiles.

Enfin, la connectivité cellulaire peut être apportée soit *via* des cartes SIM intégrées dans le véhicule, soit *via* le smartphone de l'utilisateur.

3. Quelles évolutions pour le secteur automobile ?

1. Une évolution des relations entre constructeurs automobiles et opérateurs mobiles

L'enjeu de fiabilité au centre des débats

Pour les constructeurs automobiles, la connectivité des véhicules permet d'augmenter l'attractivité de ces derniers sur plusieurs points. Tout d'abord, elle permet d'offrir de nouveaux services dits « sous le capot » tels que la maintenance ou la sécurité⁸. Ensuite, elle permet d'offrir une plus grande gamme de fonctionnalités et de loisirs, dites « sous l'habitacle » à destination des conducteurs⁹.

Ces développements conduisent les constructeurs automobiles à exiger des niveaux de fiabilité et de couverture plus importants. Toutefois, les relations contractuelles existantes engagent généralement les opérateurs mobiles sur des obligations de moyens, ce qui ne répond que partiellement aux besoins des constructeurs automobiles, selon ces derniers. Selon un opérateur, il sera impossible de garantir une réelle fiabilité de la communication sur une large part des réseaux routiers, ce qui rend nécessaire le développement de véhicules apportant un niveau suffisant de sécurité y compris en l'absence de connectivité.

De plus, certains opérateurs signalent avoir recours au *roaming* avec des opérateurs étrangers, pour assurer la continuité du service lorsque les véhicules connectés circulent à l'étranger. Ce recours au *roaming* peut conduire, selon certains opérateurs, à complexifier la chaîne de responsabilité entre les différents acteurs, et donc à réduire la capacité des opérateurs à engager leur responsabilité sur un niveau donné de fiabilité de la communication. Certains opérateurs prédisent l'émergence d'un nouveau marché consistant en la fourniture de forfaits transfrontaliers spécifiques aux STI routiers, et s'attendent à l'apparition de nouveaux acteurs internationaux sur ce segment.

Par ailleurs, il n'est pas exclu que certains constructeurs automobiles fassent le choix de devenir eux-mêmes MVNO¹⁰ pour assurer eux même la connectivité de leur véhicule. D'une part, cette position

⁷ Accès à Internet à des fins de divertissement, signalisation de points d'intérêt, activation à distance du moteur, localisation en cas de vol...

⁸ *Via*, par exemple, des mécanismes de remonté d'alertes.

⁹ Déverrouillage à distance du véhicule, accès à des contenus en ligne, etc.

¹⁰ *Mobile Virtual Network Operator* : opérateur de réseau mobile virtuel.

leur permettrait de profiter de la taille de leurs parcs pour obtenir de meilleures conditions de négociation notamment de *roaming* et de qualité de service, d'autre part, les constructeurs pourraient ainsi optimiser leurs niveaux de qualité de service par gamme de véhicules.

Du côté des opérateurs mobiles, certains reconnaissent que des niveaux de fiabilité très élevés peuvent être obtenus dans des environnements contrôlés, où l'aménagement est entièrement maîtrisé et contrôlé par un gestionnaire unique (voies ferrées, sites industriels précis, voire autoroutes). Ils indiquent néanmoins que les niveaux de fiabilité souhaités par les constructeurs automobiles paraissent hors de portée à l'échelle nationale et ce, en raison des multiples sources de défaillance de la communication pouvant intervenir au-delà du périmètre de la seule communication radio – qui est sous le contrôle des opérateurs de télécommunication. L'absence de couverture mobile pourrait alors être compensée par des communications en V2V, ou encore, par le téléchargement en amont des données nécessaires afin de pouvoir circuler dans les zones blanches des réseaux mobiles si celles-ci sont anticipées avec suffisamment de précision.

Enfin, équiper les véhicules avec les deux technologies est envisagé par certains acteurs à terme, pour bénéficier d'une plus grande fiabilité.

Les visions de modalités de couverture 5G

Selon les opérateurs interrogés, la couverture 5G se heurtera non seulement au coût du déploiement des infrastructures mais aussi au coût d'accès aux pylônes le long des autoroutes facturé par les gestionnaires autoroutiers. Par ailleurs, les gestionnaires autoroutiers pourraient être tentés de déployer leurs propres infrastructures de sorte à proposer de nouveaux services renforçant l'attractivité du transport en voiture directement aux conducteurs, sans passer par les opérateurs mobiles. Interrogé sur la pertinence du modèle envisagé en Allemagne (couverture mutualisée le long de certains axes routiers), au moins un opérateur ne s'est pas montré favorable à une telle politique¹¹. En tout état de cause, les opérateurs soulignent qu'une couverture URLLC¹² le long des routes n'aurait de sens économiquement que si les utilisateurs montrent une propension à payer pour des services qui restent encore à définir.

Une concurrence mobile sur les marchés des voitures connectées ?

Actuellement, l'opérateur en charge de la connectivité du véhicule est sélectionné par le constructeur automobile. Selon les constructeurs, cette relation contractuelle unique permet un déploiement d'infrastructures plus adapté à leurs besoins. Le fait que l'opérateur mobile en charge de la connectivité du véhicule soit déterminé par le constructeur, et non l'utilisateur final, peut sembler davantage lié à des questions commerciales que techniques, les constructeurs souhaitant préserver une relation directe avec les conducteurs.

Si opérateurs et constructeurs défendent que les communications de nature technique entre le véhicule et son constructeur doivent s'effectuer *via* un opérateur mobile choisi par le constructeur, ces derniers s'accordent également à dire que la connectivité liées aux usages des utilisateurs pourrait être effectuée par les réseaux mobile de leur choix. Les véhicules pourraient par exemple être équipés d'une double carte SIM, l'une inhérente au constructeur et dédiée aux aspects techniques du véhicule, l'autre choisie par l'utilisateur et utilisée à des fins de divertissement. Certains acteurs avancent que laisser ce choix à l'utilisateur lui permettrait de choisir le niveau de

¹¹ Il convient toutefois de souligner que la raison avancée par l'opérateur n'est pas de nature technique ou financière, mais concerne la charge administrative potentiellement associée à cette mesure.

¹² *Ultra Reliable Low Latency Communications*.

connectivité répondant à ses besoins et de retrouver (à tout le moins en partie) l'environnement de son opérateur mobile dans sa voiture (l'environnement à bord d'un véhicule ne dépend pas seulement de l'opérateur mobile, mais aussi du système d'exploitation du véhicule). Quel que soit l'accès retenu, dès lors qu'il permet un accès à un internet général, les utilisateurs bénéficient d'un internet ouvert en application du règlement sur la neutralité du Net.

2. Mobility as a service : de la voiture objet à la voiture service

En complément des modèles basés sur une des technologies de connectivité embarquée dans les véhicules, certains acteurs prédisent l'émergence d'un modèle où la connectivité est apportée par le smartphone de l'utilisateur. Il est probable que ces deux modèles coexistent, dans la mesure où leur pertinence dépend du cas d'usage envisagé.

La 5G cellulaire : le smartphone au cœur de la voiture-service ?

Les technologies de connectivité embarquée présentent un niveau de fiabilité plus élevée, car elles sont intégrées avec toute la chaîne de commande du véhicule et offrent une garantie anti-intrusion plus importante qu'avec les smartphones. Elles semblent donc a priori plus adaptées aux cas d'usage critiques, liés notamment à la sécurité des passagers.

Pour autant, pour les cas d'usage peu ou pas critiques (i.e. qui ne sont pas liés à la sécurité), les solutions basées sur smartphone présentent de l'intérêt. Ainsi, il est à noter que les premières applications d'aide à la conduite qui ont vu le jour ont été conçues et déployées par des acteurs non issus du monde automobile, en appui sur l'ouverture des réseaux GPS puis des réseaux mobiles haut débit. La puissance accrue des réseaux mobiles et des terminaux, qui facilitent les mises à jour et les ajouts d'informations sur le trafic, ont par exemple conduit à une diminution constante de l'usage des GPS intégrés aux véhicules au bénéfice de versions applicatives disponibles sur smartphones. Plus généralement, les applications très innovantes sont plus facilement susceptibles de se développer sur smartphone, en raison des temps d'appropriation et de déploiements plus courts que permet ce support, les coûts de changement d'un smartphone ou de mise à jour d'une application étant nettement inférieurs à ceux d'un véhicule. De plus, l'équipement en smartphones ne concerne pas seulement les conducteurs, mais aussi les personnes vulnérables telles que les piétons ou cyclistes, ce qui facilite le développement de solutions plus globales. Enfin, le marché des applications mobiles est caractérisé par un rythme d'innovation très soutenu, susceptible de faciliter le déploiement à grande échelle et sur un cycle rapide de solutions applicatives multi-plateformes. La 5G pourrait être supportée plus rapidement dans les smartphones que dans les solutions embarquées. La 5G pourrait donc conforter le rôle important des smartphones pour des cas d'usages non liés à la sécurité. *A contrario*, les solutions embarquées dans le véhicule peuvent mettre plus de temps à être déployées par les constructeurs et à se faire adopter par les consommateurs. Ces solutions sont notamment soumises à des modalités de mises à jour plus contraignantes.

Vers un modèle hybride ?

Un expert interrogé estime qu'il serait possible d'envisager un modèle hybride en appui sur des UBR, lorsqu'elles existent, et les smartphones des usagers, avec une complémentarité de services qui apparaîtra spontanément en fonction de leur qualité, pertinence et fiabilité.

Par ailleurs, avec la quantité de capteurs qu'il intègre, le véhicule actuel peut être identifié comme un capteur mobile. Ses données peuvent être, pour la plupart, accessibles *via* une prise diagnostic (OBD, On Board Device) standardisée, qui permet de faire remonter ces données vers un smartphone pour envisager diverses applications, et ce sans déploiement d'infrastructures dédiées.

Réseaux du futur

Note n° 3

Enjeux de connectivité : l'exemple des territoires « intelligents »

4 juillet 2019

Introduction :

Dans un monde de plus en plus numérique, les services à disposition de la population évoluent : objets et véhicules connectés, réalité augmentée, vidéos en haute définition, dématérialisation des procédures, travail à distance, optimisation des processus de production, etc. Ces nouveaux services nécessitent que des solutions de connectivité adaptées soient mises en place. La façon dont les usages des prochaines années et les technologies de connectivité associées pourront affecter les réseaux peut être illustrée à travers de multiples exemples. La présente note cadre l'analyse sur l'exemple des territoires « intelligents » où la forte densité d'objets à connecter soulève en effet une multiplicité d'enjeux sur ces sujets.

L'ajout d'une couche technologique sur les infrastructures des territoires comporte en effet certaines problématiques importantes : dans ces territoires, sont susceptibles de se développer simultanément plusieurs usages dont les exigences en matière de connectivité sont multiples. Débit intense, latence réduite, couverture étendue et continue en extérieur (*outdoor*) et à l'intérieur (*indoor*), sont autant de caractéristiques que devront pouvoir satisfaire les réseaux dans les 5 à 10 prochaines années.

Un certain nombre de problématiques concernant les évolutions des réseaux de télécommunications sont ainsi générées par le développement des usages. Quelles technologies de connectivité utiliser pour connecter les divers objets des territoires intelligents et comment assurer la disponibilité des réseaux correspondants, leur performance, leur résilience et la cohérence de leurs déploiements ? Quels seront les besoins en interopérabilité des réseaux supportant des technologies variées ? Comment les réseaux pourront-ils assurer la montée en charge nécessaire face à la multiplication du nombre d'objets à connecter, que ce soit au niveau du réseau de collecte ou dans le cœur de réseau ? Enfin, quel est le rôle des pouvoirs publics locaux dans le déploiement de ces projets numériques ?

La présente note s'attachera en premier lieu à définir les territoires intelligents et leurs besoins de connectivité (1) avant d'aborder les principales problématiques d'ordre technique associées aux déploiements des solutions de connectivité dans les territoires intelligents. Elle s'intéressera ainsi aux questions de disponibilité des fréquences, d'interopérabilité, de résilience et de mutualisation (2). Enfin, les questions liées à la gouvernance et au financement des territoires intelligents seront présentées (3). Les enjeux sous-jacents à l'ensemble de ces questionnements seront décrits en mentionnant, lorsque cela est possible, la position des acteurs de l'écosystème interrogés.

1. Les territoires « intelligents », un cadre d'analyse des enjeux de connectivité

1. L'exemple du territoire « intelligent »

L'apparition de nouvelles technologies permet l'émergence de nouveaux usages entraînant à leur tour la mutation des réseaux. La forte densité d'activités sur certaines typologies de territoires soulève de nombreux enjeux de connectivité et représente un cadre d'analyse privilégié en ce qu'y cohabitent un grand nombre d'acteurs de différentes natures selon que les territoires soient urbains, péri-urbains ou ruraux.

Cette multitude d'acteurs, mais aussi de projets et de typologies de territoires, rend difficile une définition arrêtée du concept de « territoire intelligent ». La Commission européenne définit toutefois **un territoire intelligent comme un lieu dans lequel les réseaux et services traditionnels sont conçus de façon plus efficace grâce à l'usage du numérique et des technologies de télécommunication, au bénéfice des habitants et des entreprises**¹. L'objectif d'un territoire intelligent est ainsi de favoriser la coopération entre les acteurs de différents secteurs présents sur le territoire, en mettant en regard leurs besoins, leurs compétences et leurs ressources, optimisant ainsi les services existants ou en proposant de nouveaux.

2. Des services exigeants en matière de connectivité

Mobilité, approvisionnement énergétique, assainissement, sécurité... un territoire intelligent peut enrichir une grande diversité des services qu'il propose en les appuyant sur des solutions numériques. Pour autant, si la connexion aux services de télécommunications apparaît comme le préalable nécessaire à leur développement, **tous ces services n'ont pas les mêmes exigences en termes de connectivité**. Les différents usages des technologies de connectivité peuvent ainsi schématiquement être regroupés en plusieurs catégories simplifiées. On peut tout d'abord distinguer les usages nécessitant des **débits importants**, parmi lesquels, par exemple, les services de vidéosurveillance ou la réalité virtuelle pour des applications touristiques. Ensuite, peuvent être identifiés des usages pour lesquels une **couverture étendue** est nécessaire, tels que les services de gestion de réseaux urbains, la collecte d'ordures ménagères, ou encore certains services de mobilité (transports autonomes ou connectés, localisation de vélos ou trottinettes en libre-service) ou de tourisme. Enfin, quelques services pourraient être particulièrement exigeants en matière de **latence ou encore de fiabilité**. C'est le cas par exemple de certains services liés à la mobilité (certaines expérimentations visent ainsi à reprendre le contrôle d'un bus à distance en cas de problème).

À ces exigences s'ajoute la question du **lieu où ces usages sont exercés** car ils peuvent se retrouver aussi bien en **extérieur** (lampadaires connectés, capteurs de pollution, etc.), qu'à **l'intérieur** des bâtiments (éclairage intelligent, détecteur de fumée, etc.). Selon cette localisation, le service offert en matière de connectivité pose des problématiques différentes. En effet, si les opérateurs se concentrent sur les déploiements des réseaux en extérieur, certaines bandes de fréquences utilisées pour la 4G (puis la 5G) peuvent être moins pénétrantes à l'intérieur des bâtiments, notamment lorsque ceux-ci répondent aux nouvelles normes HQE et absorbent particulièrement les ondes courtes (hautes fréquences). Un besoin déterminant des territoires est donc d'apporter une connectivité adaptée aux usages dans ces différentes zones, et de la gérer sur le plan des

¹https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en

connectivités cellulaires mobiles alors que la question de la couverture se pose en termes différents selon que les zones *indoor* sont publiques ou privées, ou en fonction de leur architecture et de leur degré de cloisonnement (métro, tunnels, égouts, etc.). Les opérateurs mobiles ont d'ores et déjà pris des engagements pour répondre à ces questions dans le cadre du « *New Deal* » mobile. Ces derniers ont ainsi l'obligation de proposer sous certaines conditions, en 2018 ou 2019 selon les cas, des offres intégrant la voix et les sms sur Wifi à destination du grand public et des entreprises permettant de couvrir l'intérieur des bâtiments². À noter sur ce point toutefois qu'outre des solutions spécifiques aux réseaux cellulaires développées plus loin, l'*indoor* peut également être couvert par d'autres technologies de connectivité (Wifi, LiFi, réseaux filaires, etc.).

La suite du document se focalise sur l'analyse des différentes questions liées aux besoins de connectivité, le sujet de l'exploitation des données et de leur protection étant hors du champ de la présente analyse.

2. Quelles pourraient être les réponses aux besoins des territoires intelligents en matière de connectivité ?

Du fait d'usages divers exigeant des technologies de connectivité aux caractéristiques variées et offrant une couverture continue en *indoor* et en *outdoor*, nombreux sont les défis qui se posent aux acteurs désireux de se lancer dans des stratégies de territoires intelligents. Quelles sont alors les solutions qui pourraient permettre de répondre à ces attentes ? Certaines propositions des acteurs de l'écosystème et leurs enjeux seront abordés dans la suite de l'analyse.

1. Connecter les objets avec la technologie adaptée a. Cartographie des technologies de connectivité³

Les technologies de connectivité sont multiples et en permanente évolution. Elles peuvent toutefois, en l'état des développements, être classées en plusieurs catégories.

- Les réseaux apportant des **hauts, voire très hauts débits sur des distances pouvant être relativement longues** (allant d'une connectivité très localisée à quelques kilomètres, 100, voire 200 km) sont représentés majoritairement par les réseaux cellulaires mobiles (2G/3G/4G/5G), les réseaux filaires (cuivre, câble et fibre optique), et les réseaux satellitaires. La 5G, qui pourrait être classée dans cette catégorie, devrait offrir en supplément une latence significativement réduite comparativement aux autres réseaux cellulaires.
- Parallèlement, il existe des **réseaux bas débit, basse consommation, longue portée** (Low Power Wide Area Network : LPWAN), **parfois également qualifiés de «réseaux 0G»**⁴. Ces réseaux peuvent utiliser des bandes de fréquences sous régime d'autorisation générale⁵ (c'est le cas des réseaux LoRa et Sigfox), ou des bandes de fréquences sous régime d'autorisation individuelle⁶, *via* les réseaux des opérateurs grand public (c'est le cas des technologies NB-IoT et LTE-M). Ils sont optimisés pour **connecter en grand nombre des**

² Davantage de précisions sont disponibles ici : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/new-deal-mobile.html#Indoor>

³ Voir l'annexe 1 pour davantage de détails.

⁴ Des précisions sur les distinctions entre LPWAN sont apportées en annexe 1.

⁵ Dans ces bandes de fréquences, les utilisateurs peuvent émettre sans avoir à obtenir d'autorisation auprès d'une autorité publique. Ils doivent simplement respecter les conditions d'utilisation définies par l'Arcep. On parle également de « **bandes libres** », car leur utilisation peut se faire gratuitement.

⁶ Pour ces bandes de fréquences, les utilisateurs doivent obtenir une autorisation d'utilisation de fréquences auprès d'une autorité publique, qui les autorise alors à émettre dans une bande de fréquence et une zone géographique donnée. Les titulaires de telles autorisations sont assujettis au paiement d'une redevance.

objets sur une moyenne et longue portée et sont très peu consommateurs d'énergie ; ils sont ainsi particulièrement adaptés à la supervision lorsque que de nombreux points de mesures sont à contrôler sur un périmètre géographique étendu, et à la création de systèmes de contrôle de processus (télé-relève d'eau, d'énergie, de pollution, suivi de conteneurs, etc.) sur une longue durée. Il convient de préciser que si la 5G n'est pas qualifiée de LPWAN, elle permettra à terme de satisfaire les usages mentionnés ci-dessus.

- Ces solutions sont à différencier d'autres **technologies de faible distance** (entre 10 et 250 mètres), comme le Bluetooth, le Zigbee, le Wifi, et le LiFi⁷, technologies ayant l'avantage d'offrir une faible consommation énergétique. Ces technologies de courte portée ne répondent pas aux besoins de connectivité à l'échelle d'un quartier ou d'un territoire.

b. Quelle coexistence pour ces technologies ?

Dans le cadre de l'analyse des territoires intelligents, au-delà de l'objectif général de connectivité des individus, une problématique importante réside dans la fourniture d'une connexion aux objets intelligents déployés. Différents types de technologies coexistent pour répondre à ces besoins de connectivité, qui passent essentiellement par les réseaux sans fil, plus à même de répondre aux usages correspondants.

L'éventail des solutions de connectivité des objets proposées soulève des questions sur l'évolution du marché dans les prochaines années, notamment vis-à-vis de la complémentarité et de la concurrence des technologies en jeu. Sans surprise, si tous les acteurs interrogés s'accordent sur l'important rôle que jouera la 5G dans les territoires intelligents, leurs avis divergent sur la place qu'elle laissera aux autres technologies : alors que certains hésitent à se prononcer sur la dynamique à moyen terme d'un marché encore peu mature, d'autres prévoient une coexistence entre les différentes technologies ou, *a contrario*, une prépondérance de la 5G⁸.

Des acteurs issus du monde de l'IoT (*Internet of things*), des équipementiers et certains opérateurs estiment ainsi que les technologies de connectivité des objets sont moins concurrentes que complémentaires et que des solutions de connectivité variées coexisteront sur un même territoire, suivant les besoins spécifiques auxquels elles répondent. Ainsi, plusieurs réseaux différents pourraient être sollicités car les technologies permettraient de répondre à des besoins différents et ne seraient alors concurrentes que dans une certaine mesure. Chaque catégorie (et les différentes technologies qui la composent) pourrait alors perdurer : LPWAN (comme LoRa, Sigfox), réseaux mobiles dédiés aux objets connectés (par exemple NB-IoT, LTE-M), connectivité *indoor* de faible portée (avec entre autres le Wifi, le Bluetooth, le LiFi), connectivité fiable et à haute capacité (fibre), etc. Cette hypothèse laisserait donc une place aux technologies alternatives à la 5G dans la mesure où les besoins des territoires intelligents seraient suffisamment spécifiques et cloisonnés.

D'autres acteurs, notamment des opérateurs mobiles, estiment à l'inverse que la polyvalence de la 5G (c'est-à-dire la capacité de la 5G à répondre à des usages différenciés, notamment à travers du « *network slicing* » qui devrait permettre de proposer des services sur-mesure en matière de débit, de latence, etc.) **et son déploiement en zone urbaine en feront une technologie non seulement incontournable mais potentiellement hégémonique pour connecter les objets.** Sa capacité à connecter un grand nombre d'objets densément distribués⁹ est notamment vue comme un atout clef qui pourrait la voir s'imposer à terme face aux autres technologies qui ont moins facilement cette

⁷ Le LiFi utilise la lumière (les ondes lumineuses) pour transmettre des données.

⁸ A titre de précision, l'interopérabilité entre différents réseaux et différentes technologies peut se faire dans certains cas au niveau de couches protocolaires supérieures comme IPv6 qui s'abstraient dans une certaine limite des spécificités inhérentes à chaque réseau/technologie.

⁹ La 5G devrait permettre de connecter 1 million d'objets par kilomètre carré, contre quelques milliers ou dizaines de milliers pour la 4G en NB IoT ou LTE-M

capacité. La prédominance de la 5G pourrait alors intervenir à deux niveaux. Elle pourrait soit remplacer les technologies concurrentes de bout en bout, soit les « satelliser », c'est-à-dire faire transiter les données captées par d'autres technologies (type LPWAN) sur son cœur de réseau. Les avantages techniques de la 5G s'adosent à un **besoin fort d'harmonisation** ressenti par les acteurs d'envergure internationale, qui souhaitent pouvoir industrialiser et exploiter un nombre limité – voire unique – de solutions de connectivité pour des raisons d'optimisation des coûts dans l'articulation des technologies et d'interopérabilité.

Parmi ces acteurs prévoyant une prédominance de la 5G, des divergences apparaissent toutefois, notamment au niveau de l'architecture des déploiements 5G. Certains acteurs soulignent l'importance des *small cells*¹⁰ pour répondre aux besoins de couverture des zones *indoor*, mais aussi pour permettre un apport capacitaire dans les zones à forte densité de trafic en complément des *macro cells* (par exemple dans les hubs de transport tels que les gares et les aéroports, ou encore dans des « lieux d'intérêt¹¹ » identifiés). À l'inverse, d'autres acteurs plaident en faveur d'une harmonisation des solutions de connectivité, *via* par exemple l'utilisation unique de *macro cells* sans faire appel aux *small cells*. Cette sur-densification de la couche macro-cellulaire serait privilégiée dans la mesure du possible car l'hétérogénéité de la superposition des *small cells* sur une couche macro-cellulaire peut être complexe ; en outre, il existe des difficultés inhérentes à la performance d'une *small cell*¹².

c. Selon la combinaison technologique retenue, des questions se posent concernant la gestion des connectivités sur les territoires.

Une première question est celle de la disponibilité des fréquences, qui pourraient constituer une ressource rare dans un contexte où la croissance annoncée du nombre d'objets connectés est extrêmement importante (9,1 Mds en 2019 contre 25,5Mds estimés en 2025)¹³.

Dans l'hypothèse où la majorité du trafic serait assurée par la technologie 5G, des bandes de fréquences ont déjà été identifiées mais de nouvelles pourraient devoir l'être. Après avoir attribué la bande 700 Mhz aux opérateurs en 2015, l'Arcep prépare l'attribution de nouvelles bandes de fréquences pour la 5G (3,5 GHz, 26 GHz notamment¹⁴). Ces dernières bandes devraient répondre aux besoins 5G (en termes de débit notamment) sans toutefois, du fait d'une propagation plus faible, permettre une couverture optimale. À l'inverse, la bande 700 MHz autorise une couverture ambitieuse, mais sera, en raison d'une faible largeur de bande, plus restrictive sur les débits. Aussi, la satisfaction entière des besoins de la 5G en termes de débit et de couverture pourrait nécessiter l'usage d'autres bandes basses (la bande L par exemple ou d'autres bandes qui pourraient basculer dans le secteur télécom). **L'enjeu de disponibilité des fréquences concerne aussi les bandes de fréquences utilisables sous un régime d'autorisation générale, ou « bandes libres ».** Ces bandes de fréquences se caractérisent par leur simplicité d'usage : elles permettent donc de stimuler

¹⁰ Une *small cell* est une cellule dont l'antenne émet à puissance rayonnée réduite et avec une portée réduite (de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres), comparativement à une *macro cell* qui est une cellule dont l'antenne émet à forte puissance et donc à grande portée.

¹¹ Par exemple, à Paris, des quartiers comme Châtelet, Opéra ou la Défense sont des zones *outdoor* où un déploiement *small cell* est perçu comme justifié par certains acteurs.

¹² Capacité de la *small cell* à capter le trafic exactement notamment si elle est mal située par rapport à la poche de trafic. Cette problématique est très spécifique à la *small cell* qui émet à puissance très réduite contrairement à une *macro cell* qui peut compenser son mauvais positionnement par un fort rayonnement cellulaire pour capter le trafic.

¹³ GSMA, *The mobile economy 2019*

¹⁴ Les quantités de fréquences concernées sont importantes, particulièrement en bande 26 GHz. Ces bandes de fréquences sont, pour partie, actuellement utilisées à d'autres fins (boucle locale radio, collecte hertzienne, relais de données par satellite...).

l'innovation pour le plus grand nombre en offrant par exemple la possibilité de créer des solutions de connectivité sur mesure et à petite échelle¹⁵.

Au-delà de la question de la disponibilité des fréquences libres, certains équipementiers insistent sur l'enjeu d'harmonisation mondiale de l'utilisation des bandes de fréquences, jugé crucial pour les acteurs qui visent un déploiement international¹⁶. Des travaux récents ont permis l'ouverture de nouvelles bandes de fréquences pour les objets connectés, et en particulier la bande de fréquences 915 - 921 MHz va permettre de disposer d'une bande harmonisée pour l'IoT dans l'Union européenne, en Asie et en Amérique du Nord. L'ouverture de cette bande de fréquences permet également la création de réseaux mondiaux d'objets connectés et favorise la circulation d'objets connectés d'un continent à l'autre. Pour prendre un autre exemple, des travaux sont en cours pour étendre les bandes de fréquence disponibles pour l'usage WiFi à la bande 6 GHz (par exemple pour la norme 802.11ax ou 802.11bd) de manière harmonisée *a minima* au niveau européen.

Une seconde interrogation posée par la présence potentielle de multiples solutions de connectivité pour l'IoT sur un même périmètre est celle de la coexistence des réseaux et de l'interopérabilité des technologies. S'agissant de la coexistence des réseaux, si la disponibilité de solutions de connectivité variées a pour avantage d'apporter de la flexibilité dans les possibilités offertes aux acteurs, il ne faudrait pas que cela se fasse aux dépens de la qualité de service. Se pose ainsi la question de l'articulation de la couverture de ces différents réseaux coexistants, qui doit permettre de répondre aux exigences des usages (avec par exemple une couverture adéquate ou une absence de brouillage aux points de contact entre ces réseaux) et assurer la viabilité des solutions mises en œuvre.

S'agissant de l'interopérabilité, elle permettrait d'offrir une meilleure flexibilité aux utilisateurs et une plus grande sécurité dans le choix des technologies opérées en offrant en particulier la possibilité de changer de solution de connectivité en cas d'évolution technologique ou de défaillance d'un fournisseur tout en limitant les coûts associés au changement des équipements. Une alternative serait que les équipements eux-mêmes supportent plusieurs technologies de connectivité.

Des startups françaises sont d'ailleurs à l'origine de **solutions** innovantes permettant de faire cohabiter des technologies hétérogènes. Dans une ambition proche de celle des réseaux maillés¹⁷, l'une d'entre elles développe une application permettant d'hybrider les réseaux Bluetooth et Wifi pour fournir une couverture continue aux industriels dans leurs zones d'activité mal couvertes (sites de maintenance ou entrepôts par exemple). Une autre est à l'origine d'une solution modulable permettant d'accueillir sur un petit objet plusieurs technologies de connectivité rendant ainsi l'objet interopérable et adaptable aux besoins précis de son utilisateur. Le dispositif peut aujourd'hui accueillir des solutions telles que le Bluetooth, le Zigbee, le Wifi, les réseaux 3G – la compatibilité avec LoRa et Sigfox est en développement. Ces solutions permettent ensuite de répondre à différents usages, notamment le télélevé (qualité de l'air, température, humidité, etc.) et le suivi d'objets (chocs, ouverture de colis, localisation) sans enfermer l'utilisateur final dans le choix d'une technologie unique⁸.

Une troisième problématique à aborder lorsqu'il s'agit de la connectivité des objets des territoires intelligents est celle de la disponibilité des infrastructures devant accueillir l'ensemble des

¹⁵ A noter que si des contraintes techniques imposées dans ces bandes permettent d'assurer la coexistence entre les différents utilisateurs, aucune garantie d'absence de brouillage ni de qualité de service n'est assurée pour les utilisateurs.

¹⁶ En effet, la croissance de ces industriels peut dépendre de leur capacité à réaliser des économies d'échelle par effet volume (au niveau de la certification des équipements notamment), en s'appuyant sur des systèmes utilisant les mêmes fréquences.

¹⁷ Réseau local, sans fil ou virtuel, qui se sert d'une topologie de maillage complet ou partiel comme méthode de connexion décentralisée, c'est à dire que les appareils ou utilisateurs peuvent se connecter entre eux, sans l'intervention d'un appareil central, à la différence des réseaux non maillés.

équipements de connectivité (capteurs, caméras, antennes, équipements de collecte etc.). Certains acteurs interrogés ont soulevé le problème de la quantité limitée de mobilier urbain apte à accueillir ces équipements, en raison en particulier de contraintes au niveau de l'aménagement urbain, de l'espace disponible parfois réduit sur ces mobiliers (ex : lampadaires) ou encore de la complexité de certains espaces intérieurs nécessitant le déploiement de solutions complémentaires *indoor* (ex : couloirs du métro). Cette position ne fait cependant pas l'unanimité, certains opérateurs ne soulevant pas d'enjeux particuliers sur la disponibilité des espaces. À noter également à ce sujet que la question de l'acceptabilité sociale de la présence des dispositifs de connectivité en zones habitées est également susceptible de se poser avec acuité dans les années à venir, les préoccupations des administrés relatives à l'exposition aux ondes et aux considérations esthétiques étant les plus couramment citées par les acteurs interrogés.

A ce sujet, l'opportunité de la mutualisation des objets à connecter (capteurs multi-usages) mais également de leurs infrastructures d'accueil ainsi que les dispositifs de connectivité en eux-mêmes pourrait être étudiée. Cependant, une orientation vers davantage de mutualisation impliquerait de réaliser un arbitrage entre plusieurs paramètres impliquant une concertation entre les acteurs de l'écosystème. La faisabilité technique de mutualisation des *small cells* est actuellement à l'étude par le Comité d'experts techniques sur le Mobile. En effet, si cela pourrait effectivement permettre une **couverture multi-opérateurs** de zones jusqu'alors peu ou pas couvertes et pourrait répondre aux problématiques de **gestion esthétique du paysage et d'économie d'énergie**, la mutualisation soulève néanmoins des enjeux de **faisabilité technique complexes** (coordination et différenciation des acteurs, gestion du spectre), **de dynamique concurrentielle** et de **sécurité des réseaux**.

Enfin, une question importante est celle de la résilience des réseaux. Cette question se pose de manière générale et dans le cadre de l'exemple des territoires intelligents. En effet, dès lors que le fonctionnement de nombreux services publics (transports, gestion des ordures, parking connectés) ou critiques (éclairage public, signalisation routière, *smart grids*) dépend des réseaux de connectivité, les problèmes techniques, les actes de malveillance, de négligence, ou les catastrophes naturelles peuvent rapidement mettre en péril les territoires et leurs administrés. Se pose alors la question de l'anticipation des défaillances des réseaux et des solutions palliatives permettant d'assurer la continuité de service et la protection des habitants. Plusieurs interrogations apparaissent ainsi : quelles technologies sont les plus résilientes¹⁸ ? Comment renforcer la sécurité des réseaux ? Une seule technologie est-elle suffisante pour permettre un niveau de résilience adéquat ou doit-on exploiter plusieurs technologies (avec les éventuelles complexités quant à la gestion que cela suppose) ?

2. Gérer l'impact des nouveaux usages sur les réseaux de collecte et les cœurs de réseaux

L'augmentation du nombre d'objets à connecter et du trafic généré par les utilisateurs pose la question de la capacité des réseaux à s'adapter aux nouveaux usages. En particulier, la multiplication des bornes de connectivité (stations de base radio-cellulaire 2G/3G/4G/5G, bornes de système radio non 3GPP types Wifi, Sigfox, LoRa, etc.) influence le choix des réseaux de collecte, et l'augmentation du nombre d'objets à gérer impose des contraintes sur les cœurs de réseaux.

a. Impacts sur les réseaux de collecte

Au niveau du réseau de collecte, différentes technologies de connectivité sont possibles. Pour un service de communications sans fil, le réseau de collecte (ou réseau *backhaul*) décrit l'infrastructure déployée entre les stations de base (antennes réseau mobile, LoRa ou Sigfox, bornes Wifi...) et le cœur de réseau de l'opérateur. Historiquement, **les opérateurs mobiles ont utilisé très**

¹⁸ Par exemple, des réseaux propriétaires peuvent être plus résistants aux tentatives de brouillages.

majoritairement les technologies de faisceaux hertziens (FH) licenciés (environ 2/3 des liens au niveau mondial¹⁹) **et de fibre optique** (environ 1/4 des liens), en proportion très variable suivant la zone géographique (80% en fibre en Asie du Nord et de l'Est ; 90% en faisceaux hertziens en Asie du Sud et du Sud-Est). La zone Europe et la France se situent dans la moyenne mondiale avec environ 70% des liens de collecte mobile réalisés en faisceaux hertziens.

Si les acteurs s'accordent à identifier la fibre optique comme support important pour les déploiements futurs, du fait de sa fiabilité et de son évolutivité en débit, **ils notent toutefois qu'elle n'est pas toujours la plus adaptée** pour répondre à chacun des usages (par exemple, les usages nécessitant de faibles débits peuvent se satisfaire d'une autre solution de collecte). Par ailleurs, les **évolutions technologiques des FH de ces dernières années notamment en termes d'augmentation des débits, des coûts réduits et de rapidité de déploiement devraient maintenir un usage significatif des FH dans les prochaines années.**

Parmi les méthodes alternatives utilisées dans les réseaux de collecte mobile existe la technologie satellitaire. Toutefois, même si elle continue à évoluer, notamment avec les projets de constellation en orbite basse visant à réduire les problèmes de latence, cette solution devrait rester une solution d'appoint²⁰ spécifique à certaines poches de trafic isolées ou sinistrées, pour des usages non capacitaires et non contraints en latence. La technologie cuivre, utilisée auparavant pour le raccordement des stations de base 2G²¹ est moins utilisée du fait de sa forte limitation en débit²². Enfin, en 2018, il n'existe pas de projet commercial d'envergure d'utilisation des réseaux câblés identifié²³, malgré les évolutions²⁴ apportées par l'évolution de la norme DOCSIS²⁵.

La tendance à la double augmentation de la capillarité des antennes de réseaux mobiles (ex. densification de type *small cells*) et des débits associés, pose la question de la mutualisation avec les réseaux fixes afin de maîtriser les coûts de la collecte. En France, lorsque les stations de base des réseaux mobiles sont raccordées en technologie fibre, la solution utilisée est l'utilisation de l'infrastructure fibre dédiée (boucle locale optique dédiée, ou BLOD). Le coût intrinsèque du raccordement en infrastructure BLOD est généralement élevé, mais il pourrait être jugé non critique lorsqu'il est ramené à l'ensemble des coûts nécessaires à l'édification d'une station de base de type *macrocell* et lorsqu'est pris en compte le fait qu'en environnement urbain les distances en fibre dédiée sont en moyenne plus courtes ; toutefois, ce coût pourrait devenir structurant lorsqu'il sera ramené au coût d'implantation d'une station de base de type *small cell*.

Le déploiement des réseaux FttH, compte tenu de leur capillarité et des débits atteignables, constitue une opportunité pour réaliser le raccordement de ce type de site. Certains opérateurs convergents fixe-mobile envisagent d'utiliser le réseau FttH pour raccorder leurs *macrocells*. En lien avec ce sujet, l'Arcep a récemment rendu une décision de règlement de différends dans laquelle elle

¹⁹ Etude *GSM Mobile backhaul options - Spectrum analysis and recommendations* – GSM A / ABI Research, November 2018 – Executive Summary.

²⁰ En 2018, moins de 2% de la collecte des opérateurs mobiles au niveau mondial se faisait via des technologies satellitaires. Source : étude *GSM Mobile backhaul options*.

²¹ En 2018, moins de 5% de la collecte des opérateurs mobiles au niveau mondial se faisait via la technologie cuivre. Source étude *GSM Mobile backhaul options*.

²² Le G-Fast ou FTDP, *fiber to the distribution point*, permet d'obtenir des débits importants avec des déploiements en fibre avec réutilisation du cuivre pour les derniers mètres du raccordement. Cette technologie est utilisée ou envisagée dans certains pays pour faire de la montée en débit et elle pourrait être mobilisée, le cas échéant, pour le raccordement de stations de base mobile ou d'IoT lorsque les conditions s'y prêtent (environnement urbain, distances courtes etc.)

²³ Hormis les Femtocell, branchées derrière les box des FAI. La Femtocell utilise en réseau de collecte l'accès Internet du client final, et s'appuie de fait sur tous types de technologies d'accès fixe sous-jacentes (DSL, Câble, FttH).

²⁴ Cf. note technique *DOCSIS technologies for mobile backhaul*, Cable LABs, Technical Brief, May 2018.

²⁵ Data Over Cable Service Interface Specification, actuellement normalisée jusqu'à la version Docsis 3.1.

a fait droit à la demande de Free de pouvoir raccorder les stations de base de Free Mobile à l'aide du réseau FttH d'Orange qu'il cofinance (dans les cas où elles sont disponibles et qu'elles n'obèrent pas la capacité de raccorder un utilisateur final et le respect de l'obligation de complétude par Orange). Dans le prolongement de cette décision, des offres de raccordement ont émergé dans les offres d'accès des opérateurs d'infrastructure FttH. L'utilisation du réseau FttH pour le raccordement de sites mobiles **pourrait ainsi se révéler pertinent pour contribuer à la satisfaction des besoins de connectivité mobile des territoires et des utilisateurs, a fortiori dans un contexte de densification des réseaux mobiles voire** dans le cadre de déploiement des *small cells* si les opérateurs font ce choix avec l'émergence des réseaux 5G, ou encore de réseaux dédiés aux objets connectés. Les offres d'accès (spécifications techniques, éligibilité, désaturation...) pourraient alors devoir être adaptées pour mieux tenir compte de ces nouveaux besoins *ab initio* ou les rendre possibles après les déploiements initiaux.

Comme précédemment indiqué la collecte hertzienne dispose également de nombreux atouts. Selon une étude du GSMA²⁶, les faisceaux hertziens représentent l'option privilégiée par les opérateurs pour collecter leurs sites radio-cellulaires. Ainsi, à l'échelle mondiale plus de 60% des sites des opérateurs mobiles en 2017 sont collectés par FH, et le recours au FH devrait se renforcer à l'avenir. En effet, le FH pourrait permettre d'obtenir des performances capacitaires similaires à la fibre optique dans un environnement urbain du fait des distances courtes des bonds FH nécessaires pour collecter le trafic des sites mobiles²⁷, de la disponibilité des grandes largeurs de bande pour le FH dans les bandes hautes (> 70 Ghz), et d'avancées techniques notables réalisées (modulation adaptative et techniques de diversité, couplage avec des bandes basses pour améliorer la portée et réduire le nombre de bonds nécessaires). **Se pose également la question de la disponibilité de ces bandes hautes pour la collecte cellulaire (par exemple pour la bande 32 GHz et le potentiel risque de préemption d'une partie de la bande par les systèmes de radars embarqués).**

b. Impact sur les cœurs de réseaux

Dans le cadre des réseaux cellulaires notamment, la multiplication d'objets à connecter aux profils et besoins très divers pose la question des évolutions de l'architecture du cœur de réseau et de sa capacité à servir efficacement et de façon flexible cette diversité. Grâce à des technologies comme les réseaux programmés par logiciel, la virtualisation ou le calcul distribué²⁸, le cœur de réseau devrait évoluer d'une architecture monolithique et centralisée vers une architecture modulaire et distribuée. La modularité du cœur de réseau devrait permettre une exploitation dynamique et *ad-hoc* des ressources. En corollaire, la distribution de ces ressources devrait permettre au cœur de réseau d'absorber plus facilement la masse de flux de connectivité attendue (« *scalability* »). Cependant, cette évolution suppose un chantier de transformation relativement long (4 à 5 ans, voire davantage) et potentiellement coûteux, et apporte également son lot de contraintes et de risques, notamment en matière de sécurité avec l'extension de la surface d'attaque ou de risque de failles, en matière de besoin en connectivité adaptée pour mailler les différentes ressources éclatées, ou de dilution des responsabilités et de multiplication des parties prenantes²⁹.

²⁶ GSMA, « Mobile Backhaul Options : Spectrum analysis and recommendations » 11/2018

²⁷ Sous réserve de conditions de visibilité directe pour certaines configurations de solutions FH.

²⁸ Le calcul distribué consiste à répartir le calcul et le traitement de trafic sur plusieurs sites (y compris proches de l'utilisateur comme pour le *Edge Computing*) pour des raisons d'échelle (capacité à un produit à s'adapter à un changement d'ordre de grandeur) et de qualité de service (latence, fiabilité etc.)

²⁹ Pour davantage de détails, voir la note publiée par l'Arcep au sujet de la virtualisation des réseaux : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux_du_futur-virtualisation_des_reseaux-fev2019.pdf

3. Quelle stratégie adopter pour le déploiement des réseaux des territoires intelligents ?

Au-delà des questions techniques abordées jusqu'alors et des questions plus spécifiques concernant les données collectées dans leur cadre (gestion, exploitation, propriété, etc.), **l'émergence des territoires intelligents** nécessite des infrastructures adaptées et **pose des questions stratégiques de gouvernance des réseaux et de financement**. Ces deux dimensions impliquent de nombreux acteurs au premier rang desquels les pouvoirs publics. Il convient de souligner que **les collectivités ne sont pas les seules intéressées par le déploiement des territoires intelligents et que d'autres acteurs peuvent trouver un intérêt à y prendre part** (en proposant des financements ou de nouveaux services par exemple).

Dès lors, le rôle des pouvoirs publics (financement, impulsion, soutien), la forme de leur intervention (niveau et degré d'intégration des collectivités impliquées) et leur stratégie peuvent varier en fonction des contraintes, du contexte et des objectifs propres à chaque situation. Si les densités des territoires varient et posent des défis d'ampleurs différentes, les problématiques rencontrées demeurent de nature similaire en France et à l'international.

a. Gouvernance des réseaux des territoires intelligents

Les positions des acteurs interrogés ne sont pas unanimes s'agissant du rôle et de la stratégie à adopter par les collectivités dans le déploiement des réseaux répondant aux besoins en connectivité des territoires intelligents.

Se pose en premier lieu la question de l'initiateur d'une telle démarche qui spécifie les caractéristiques que devront revêtir les réseaux du territoire intelligent (services à développer, données à collecter, éventuellement technologies à déployer, etc.) puis **de la désignation du ou des acteur(s) qui déploiera(ont) et exploitera(ont) le(s) réseau(x)**.

Pour les représentants de certains équipementiers et opérateurs, il ne serait pas pertinent pour un territoire de décider de la technologie à déployer et encore moins de chercher à développer son propre réseau. Selon ces acteurs, cette mission serait plutôt l'apanage de l'opérateur du service considéré ou du réseau, détenteur des compétences nécessaires, qui se chargerait de déterminer et de déployer la solution technique la plus adaptée aux besoins et aux contraintes exprimés par les collectivités. **Selon ces acteurs, le rôle des collectivités devrait plutôt se concentrer sur la dimension « données » de la stratégie de territoire intelligent** en travaillant notamment à la collecte et la mise à disposition des données dans un format normalisé et interopérable.

Certains territoires considèrent cependant qu'ils ont un rôle à jouer dans la dimension « réseaux » de la stratégie de territoires intelligents et se sont impliqués plus directement dans la mise en œuvre de dispositifs connectés notamment dans le cadre de projets d'expérimentation. La Métropole de Rennes³⁰ a par exemple fait le choix de faire déployer un réseau expérimental LoRa³¹ dans son centre-ville en vue de tester de nouveaux usages dans le domaine des objets communicants. Une entreprise interrogée indique d'ailleurs que le choix des technologies déployées dépend souvent des collectivités qui énoncent des spécifications précises dans les appels d'offres et pas spécifiquement de contraintes physiques de déploiement. L'espace disponible dans le mobilier urbain serait d'ailleurs apte à accueillir n'importe quelle technologie, hors considération de la multiplication des capteurs qui soulèvent effectivement certaines problématiques (voir partie 2). Un équipementier souligne que le choix des technologies de connectivité dépendra *in fine* des pouvoirs publics puisqu'un critère très important de choix pourrait être celui du **coût des technologies déployées**.

³⁰ Cf. annexe 3, exemple de la Métropole de Rennes

³¹ Appelé "LoRa Fabian" pour *Long range for a beautiful internet advanced network*

La mutualisation et la cohérence des réseaux déployés sont également des questions stratégiques importantes pour les collectivités. **Un acteur interrogé signale que le succès d'un territoire intelligent dépendrait de la capacité du territoire à adopter, en particulier pour les services qu'il propose, une stratégie transversale** pour gérer la problématique de la connectivité, plutôt qu'une stratégie en silo. La transversalité permettrait en effet d'optimiser le déploiement des infrastructures et donc des coûts³² et des financements mobilisés, évitant d'engager des chantiers distincts et fragmentés sur chaque type de nouveau service développé. À l'international, le Grand Copenhague³³ est régulièrement cité en exemple avec la volonté affichée, depuis 2009, de parvenir à la neutralité carbone en 2025 en mobilisant les solutions de connectivité dans le but d'optimiser le fonctionnement de différents services dans une stratégie globale de réduction des émissions en carbone (optimisation de la collecte des déchets *via* des poubelles connectées, éclairage urbain modulable en fonction du trafic et de la luminosité, parkings intelligents (...)).

Enfin, la mutualisation interpelle également sur l'échelon de l'action publique ainsi que sur la capitalisation et la mise en commun des connaissances. En effet, la mutualisation de l'action et des problématiques liées au déploiement des territoires intelligents semble être une solution parfois opportune permettant de gérer des besoins communs à un échelon pertinent. A ce sujet, un **acteur interrogé juge essentiel de dépasser les initiatives isolées** et qu'une organisation supra-collectivités, impliquant tous les acteurs à différents échelons (intercommunaux, départementaux, régionaux, ...), soit mise en place. Au Canada, « Waterfront Toronto », est une autorité qui réunit le gouvernement canadien, la province de l'Ontario et la ville de Toronto pour financer et porter le projet de « smart city » de la métropole canadienne attribué à « Sidewalk Labs » la filiale consacrée à l'innovation urbaine de la maison mère de Google, Alphabet. À noter d'ailleurs que certains projets pilotes de territoires intelligents incluent tous les acteurs d'un écosystème et organisent la collaboration entre partenaires économiques privés et institutionnels publics dans une logique de mutualisation des compétences. Les projets menés par la ville de Paris³⁴ dans les quartiers d'expérimentation du 13^{ème} et 18^{ème} arrondissements témoignent de cette dimension collaborative et globale des stratégies de territoires intelligents. À Rennes, la présence de l'école de Télécom Bretagne et de son écosystème a pu être un élément important dans l'initiative de la ville en lui permettant d'accéder à des compétences pertinentes pour le déploiement d'un territoire intelligent. Au plan international, des initiatives collaboratives existent également et par exemple, à l'occasion du sommet France-Afrique de 2020, la Direction Générale du Trésor a lancé un appel à candidatures visant à sélectionner des projets de démonstrateurs portés par des entreprises françaises qui étaient engagées dans une logique partenariale avec les autorités locales africaines dans le domaine de la ville durable. Pour être retenu, le projet devait susciter l'adhésion auprès des autorités locales. L'appel à projet précisait notamment que les autorités locales bénéficiaires devaient être « *en mesure de s'approprier le démonstrateur, d'en maîtriser la technicité et de l'utiliser sur le long terme* »³⁵.

Aussi, la collaboration des acteurs, le partage de l'expérience, des compétences et la capitalisation des connaissances dans des instances adaptées pourraient être porteur d'efficience dans l'action des territoires.

b. Financement du déploiement des réseaux des territoires intelligents

³² Cf. annexe 3, exemple de la commune de Saint-Amand-Montrond.

³³ Cf. annexe 3, exemple du Grand Copenhague

³⁴ Cf. annexe 3, exemple de « Paris2connect »

³⁵ Davantage de détails sont disponibles ici : <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2019/03/14/appel-a-projets-solutions-innovantes-pour-la-ville-durable-en-afrique>

Un autre défi des territoires intelligents est celui de leur financement. Les services qu'ils proposent pourraient être classés en deux catégories : (i) les services fournis par des initiatives privées (trotinettes connectées, VTC, application de gestion du trafic) et (ii) les services associés à des problématiques publiques et offerts par les collectivités, qui ne génèrent pas forcément de recettes directes mais qui sont à l'origine d'externalités positives au bénéfice de la population (réduction de la pollution, optimisation du ramassage des déchets ou de la dépense énergétique, transports publics, etc.).

Comment financer ces services générateurs d'externalités positives non pris en charge par le marché ? Aujourd'hui, des acteurs estiment que certaines solutions de connectivité de type IoT sont rentables du fait des « coûts évités » (la réduction des fuites d'eau, des déperditions thermiques, optimisation des circuits de collecte des bennes à ordures) que ces solutions permettent, même si ce modèle économique peinerait pour l'heure à convaincre les territoires, qui privilégieraient les sources directes de revenus plutôt que des coûts évités.

De façon générale, les collectivités peuvent chercher des solutions de financement sous forme de prêts ou de subventions européennes ou nationales, ou s'orienter vers de nouveaux modèles de partenariat public-privé au sein de sociétés d'économie mixte. Par exemple, les autorités qatariennes ont fait du développement de la ville durable et intelligente une priorité dans le cadre du programme de développement économique du Qatar pour 2030. Les sites de Msheireb Downtown et la ville de Lusail sont identifiés comme des « territoires intelligents » et regroupent des projets tels que des solutions de mobilité durables, de gestion intelligente des déchets, de smart grid, d'arrosage automatisé etc. Pour mener à bien ces projets, les autorités cherchent à diversifier leurs sources de financement et notamment au travers de partenariats publics-privés. Une future loi régulant ces partenariats a d'ailleurs été approuvée par le conseil des ministres le 4 avril 2019³⁶.

En dépit de ces initiatives et des solutions déjà identifiées, la définition de modèles économiques pertinents adaptés aux besoins de chacun semble rester à affiner et à consolider pour le développement pérenne des territoires intelligents.

La connectivité dans les territoires intelligents présente donc différents défis pour les parties prenantes. **Pour les pouvoirs publics et les régulateurs** se posent notamment les questions d'identification des bandes de fréquences appropriées et disponibles pour permettre de répondre aux besoins en connectivité ainsi que de mutualisation du mobilier urbain pour une bonne gestion de l'espace public. **Du côté des opérateurs**, l'enjeu est davantage de dimensionner et d'organiser leur réseau de collecte de manière à pouvoir répondre aux besoins en raccordement. Enfin, **les collectivités** ont pour défi de mutualiser leurs réseaux et leurs compétences dans une stratégie globale et efficiente et de trouver le modèle économique approprié à l'émergence de territoires intelligents.

³⁶ Davantage d'informations sont disponibles ici : <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/b1f1cf8a-481d-44b2-a6fc-e51dac3c5e73/files/a94a05b9-3c0c-49b0-9149-3fb0b13a459c>

Annexes :

1. Proposition de cartographie des technologies

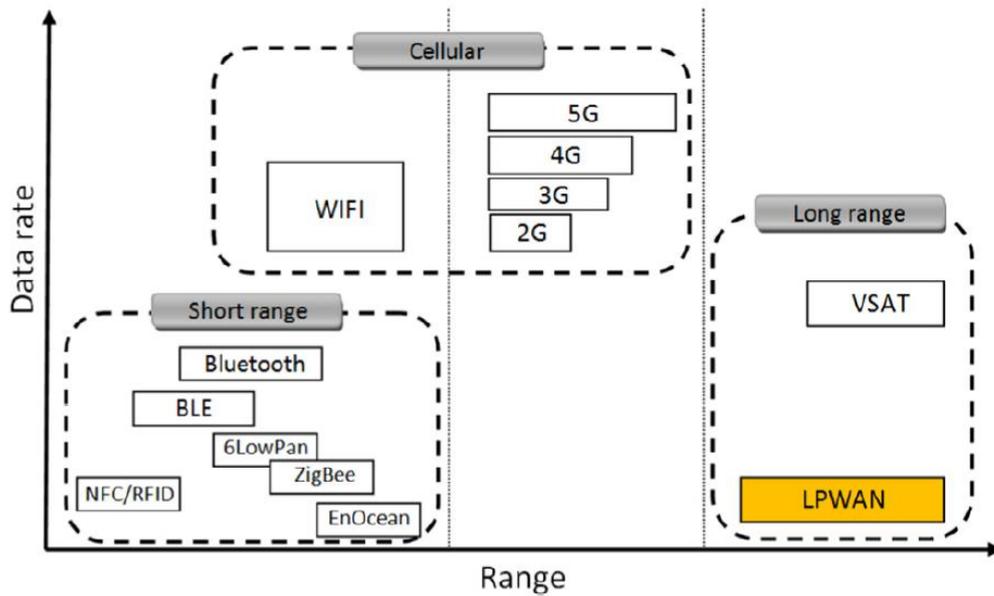


Figure 1 : Positionnement des technologies en fonction de leur portée et des débits requis³⁷

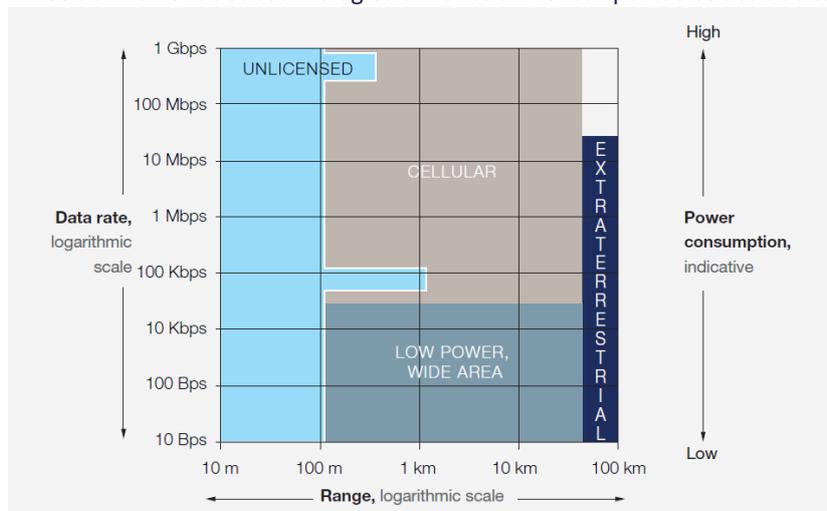


Figure 2 : Classification des technologies de l'Internet des objets³⁸

³⁷ Source : K. Mekki, et al., A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express (2018),

³⁸ Source : Etude McKinsey&Company : *The Internet of things: How to capture the value of IoT*, May 2018

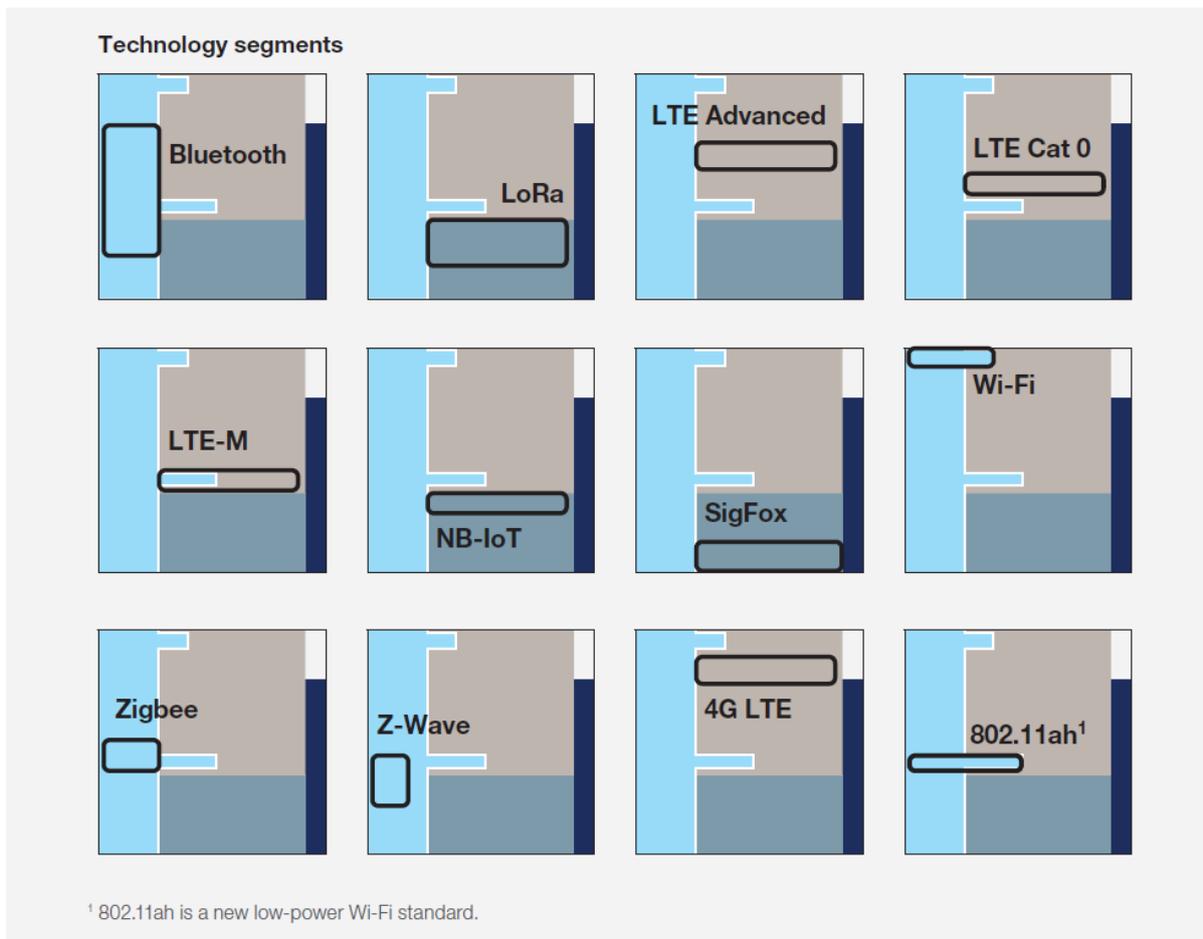


Figure 3 : Positionnement des technologies de l'internet des objets selon la classification de la figure 2 ³⁹

De nouvelles opportunités s'offrent aujourd'hui aux réseaux LPWAN en bande libre, dans la mesure où les conditions d'utilisation des objets connectés s'uniformisent progressivement au niveau mondial : en effet, l'Union européenne a préparé l'harmonisation de certaines bandes de fréquences libres – les bandes ISM (Industriel, Scientifique et Médical) – et la France appliquera ces décisions européennes en 2019. Les conditions techniques que doivent respecter les objets connectés dans ces bandes de fréquences tendent donc à devenir les mêmes en tout point du globe. En particulier, l'ouverture en cours de la bande de fréquences 915-921 MHz aux objets connectés va permettre de disposer d'une bande de fréquences harmonisée pour l'IoT avec l'Asie et l'Amérique du Nord, ce qui ouvre la voie à des économies d'échelle par effet volume, à des réseaux mondiaux d'objets connectés, et à la possibilité de déplacer plus facilement les objets connectés d'un continent à l'autre. Les entreprises qui ont recours aux solutions IoT pourront ainsi disposer d'une solution globale pour leurs besoins professionnels.

Les réseaux LPWAN visent essentiellement à répondre à des besoins de secteurs d'activité pour lesquels les données sont générées sur une emprise étendue exigeant une traçabilité continue. C'est le cas pour de nombreux services des territoires intelligents.

³⁹ Source : Etude McKinsey&Company : *The Internet of things: How to capture the value of IoT*, May 2018

2. Matrice de correspondance technologies - usages

La matrice proposée s’inspire de la grille de lecture utilisée pour la 5G :

- Ultra haut débit mobile (eMBB : enhanced Mobile BroadBand)
- Internet des objets massifs (mMTC : massive Machine Type Communication)
- Ultra faible latence (uRLLC : ultra reliable low latency communication)

Besoins fonctionnels prioritaires	Réseaux et technologies sans-fil associés	Exemple d'utilisation
Couverture étendue et sobriété énergétique du terminal	Réseaux LPWAN en bande libre (ex : Lora, Sigfox, Qowisio, Ingenu) Réseaux LPWAN via les réseaux cellulaires (ex : EC-GSM, LTE-M, NB-IoT, 5G-IoT) Réseaux satellite (ex : Inmarsat, Iridium, GlobalStar, OneWeb) Réseaux mobiles professionnels, utilisant des plages de fréquences étroites	Capteurs pour mesurer les paramètres atmosphériques, la consommation énergétique, la consommation d'eau Géolocalisation de véhicules en libre-service Eclairage intelligent, détection des fuites d'eau, maintenance prédictive, ... Logistique (suivi de la chaîne d'approvisionnement)
Débits élevés, couverture locale ou étendue	Réseaux cellulaires, à couverture étendue (ex : 3G, 4G, 5G) Réseaux à couverture locale (ex : Wifi, Lifi)	Multimédia de l'individu en mobilité Caméra de vidéo surveillance fixe Caméra de vidéo surveillance embarquée (bus,...) Mobilier urbain multimédia Bornes Wifi
Faible latence et fiabilité des transmissions	Réseaux cellulaires 5G (entre autres)	Voiture connectée Réseau de signalisation transports publics

Figure 4 : Matrice simplifiée de correspondance⁴⁰

⁴⁰ Source : Arcep

3. Exemple de cas concrets

« Paris2connect », lauréat de l'appel à projet « quartiers d'innovation urbaine » : penser la ville intelligente de manière globale et intégrée.

L'Appel à projet « quartiers d'innovation urbaine » a été lancé le 19 juin 2018 par la ville de Paris et 13 partenaires – l'Ademe, ATC France, Bouygues construction, Citéo, Eau de Paris, Evesa, Icade, Keolis, Orange, RATP, la Semapa, Sogaris, le Sycotm. Cet appel à projet thématique, encadré par l'Urban Lab de l'incubateur « Paris&Co » a permis de sélectionner 15 solutions nouvelles encore au stade de prototypes à expérimenter dans le quartier du 13^{ème} arrondissement de Paris, entre la **gare d'Austerlitz et la porte d'Ivry** considéré comme représentatif des **différents écosystèmes urbains** (habitations, commerces, campus universitaires, centres hospitaliers, entrepôts et zones logistiques, zones de mobilité...).

Les projets de cet appel à projet devaient répondre à l'une des thématiques suivantes : **mobilité, modularité des espaces urbains et ressources/économie circulaire**. Dans ce cadre, « Paris2connect » porté par **ATC France, Audiospot, Aximum, Nokia, Parking Map, RATP, Signify (ex Philips) a été sélectionné**. Il tente de démontrer comment une **infrastructure urbaine mutualisée peut répondre aux besoins exponentiels en connectivité, aux usages des territoires intelligents et de la mobilité autonome en lien avec l'arrivée de la 5G**. L'objectif des porteurs de projet est de **mutualiser leurs moyens pour développer une rue connectée** autour de trois axes : le transport autonome, l'infrastructure intelligente (carrefour, éclairage, parking et signalétique), l'expérience utilisateurs (accessibilité, attractivité et animation de l'espace public). Certains lampadaires vont être équipés de la fibre optique et intégrer différentes fonctions : caméra, relai 5G, détecteur de bruit, détecteur de pollution, systèmes AudioSpot **qui proposent une offre de guidage sonore pour les aveugles et malvoyants, navette autonome**. Les partenaires devront trouver **les réponses à l'émergence des nouveaux besoins en connectivité, surmonter les coûts associés au développement de projets sur le territoire intelligent sans pour autant surcharger les territoires avec de nouvelles infrastructures**. D'autres projets retenus adressaient également ces problématiques avec notamment **Citelum** qui utilise les infrastructures d'éclairage pour recharger les véhicules et optimiser le stationnement (ces infrastructures dotées d'une prise dans le mât d'éclairage et d'un capteur dans le luminaire, s'interfacent avec les autres services du territoire). Dans une optique « économie circulaire » **Heyliot propose « Heywaste »** une solution IoT de gestion des flux de déchets sur la base de capteurs laser basse consommation permettant de faciliter la gestion des points de collecte, d'améliorer le tri et le recyclage des déchets.

L'Urban lab de Paris & Co, la ville de Paris et 14 partenaires publics et privés ont lancé, le jeudi 4 avril 2019, la seconde édition de l'appel à projets « Quartiers d'innovation urbaine » sur le secteur de la porte de la Chapelle.

La Métropole de Rennes, active pour sur son territoire intelligent

Création du Minitel, ouverture en 1984 de la technopole « Rennes Atalante », labellisation French Tech en 2014 : Rennes Métropole s'est imposée très tôt comme un lieu d'innovation et d'expérimentation ; elle s'est donc naturellement investie dans des projets de territoire intelligent.

Pour Norbert Friant, responsable du service numérique à la Métropole de Rennes, le territoire intelligent est avant tout un territoire participatif avec une vision globale, qui parvient, grâce au numérique, à créer une synergie entre les différents acteurs et secteurs du territoire, et dans laquelle la collectivité doit avoir un rôle de facilitateur. Selon lui, c'est d'ailleurs un enjeu essentiel que de définir dès aujourd'hui le périmètre de l'action publique dans un environnement numérique.

Afin de connecter ses différents capteurs (par exemple, la ville de Rennes a installé des capteurs du taux de remplissage des conteneurs à verre, de disponibilité des places et stationnement,

fréquentation des lieux publics, etc.), la Métropole a mis en place son propre réseau LoRa⁴¹, qui compte désormais près de 25 antennes sur l'ensemble du territoire métropolitain. Dans un souci de numérisation de l'ensemble des acteurs publics, la Métropole propose aussi, au moyen de son réseau d'initiative publique déployé depuis 2007, de raccorder en fibre optique les communes ainsi que trois de leurs bâtiments communaux dans le cadre d'un groupe fermé d'utilisateurs.

Enfin, la Métropole a déployé un réseau D.A.S pour assurer la continuité de la connectivité 4G dans son métro auquel sont aujourd'hui raccordés les 4 opérateurs. La 5G est en cours d'expérimentation afin de gérer l'augmentation de nouvelle capacité mais également les nouvelles questions de sécurité que cette technologie implique.

L'exemple de Saint-Amand-Montrond⁴²

Saint-Amand-Montrond est une commune située dans le département du Cher, en région Centre-Val de Loire (env. 11 000 habitants) qui s'est lancée dès 2012 dans l'intelligence de son territoire à travers un partenariat avec M2O City (opérateur de télécommunications créé par Veolia et Orange) auquel ont été associés la Communauté de Communes Cœur de France et le le syndicat intercommunal à vocation unique (SIVU). La ville a ainsi fait installer des capteurs permettant de détecter toute anomalie ou dysfonctionnement chez l'utilisateur du service (de fuite d'eau, robinet mal fermé, éclairage public et collectif, surveillance de la consommation en gaz, en électricité etc.). La ville a également posé des capteurs de suivi de la qualité de l'air ou de sonométrie reliés à des applications directement disponibles pour les habitants. En 2016, des places de « stationnement minute » connectées ont été inaugurées en centre ville. Les agents des espaces verts ont ensuite été dotés de smartphones afin d'optimiser la planification des interventions sur le terrain et d'augmenter la productivité et la qualité de service.

La commune met en avant des impacts positifs :

- une diminution de 41% de la consommation d'eau de 2017 à 2018, soit une économie de 70000€ ;
- une économie annuelle moyenne de 50 000€ en électricité depuis 2015 ;
- une économie en gaz de 100 000 € de 2013 à fin 2017 ;
- une réduction de frais de réparation de dégâts, passant de 215 000€ en 2009 à 6 000€ en 2016, du fait de l'installation d'une quarantaine de caméras de vidéosurveillance

En moyenne, la ville estime à 150 000€ par an les économies permises pour la mairie pour un investissement initial de 30 000€ et des coûts de maintenance de 12 000€ depuis 2013. La commune met également en avant l'impact indirect de la mise en place de parkings connectés gratuits en centre-ville, indiquant une augmentation de 30% du chiffre d'affaires de la zone d'activité.

Selon la ville, cette performance s'explique notamment par le statut de « pilote » dont elle a pu profiter pour développer ces projets à moindre frais, ceux-ci étant testés à Saint-Amand-Montrond avant d'être mis sur le marché.

Un territoire intelligent à l'étranger : l'exemple du Grand Copenhague

Depuis 2009, le territoire du Grand Copenhague (1,2 millions d'habitants environ) s'est engagé dans sa transformation en territoire intelligent avec pour objectif de devenir neutre en carbone d'ici 2025. Le *Copenhagen Solutions Lab*⁴³, créé en 2014 coordonne les initiatives menées par le territoire et les classifie en plusieurs sous-ensembles : mobilité, services digitaux, environnement et climat, éclairage

⁴¹ <https://www.lora-alliance.org/>

⁴² <http://www.ville-saint-amand-montrond.fr/smart-city-f-92.html>

⁴³ <https://cphsolutionslab.dk/en>

et vie urbaine, solutions pilotées par la données. La connectivité est plus largement impliquée dans certains sous-ensembles comme par exemple les systèmes de poubelles connectées. Equipées de capteurs, celles-ci permettent d'envoyer des informations sur leur taux de remplissage et leur localisation. Cela permet de gérer efficacement les déchets du territoire en optimisant les trajets de ramassage. Des solutions de gestion du trafic ou de localisation des places de parking disponibles permettent également, grâce à des solutions de connectivité appropriées, de réduire les émissions de CO2.

La catégorie « éclairage et vie urbaine » offre également un bel exemple des opportunités offertes par les territoires intelligents. En effet, le système d'éclairage du territoire a été rénové avec des solutions permettant de moduler la luminosité en fonction de l'heure de la journée ou du trafic. Cette transformation a d'ailleurs été confiée à la société française Citelum et les démarches entreprises jusqu'ici ont permis de réaliser plus de 50% d'économie d'énergie et de diminuer de 20% les émissions de CO2 sur les lampadaires modifiés. Des solutions de télégestion et de maintenance à distance des lampadaires permettent d'assurer la qualité et la continuité de l'éclairage urbain tout en améliorant la sécurité du territoire.

Des laboratoires urbains permettent de tester les solutions à une échelle appropriée et de renseigner sur les investissements adéquats à engager. Le « Street Lab » est l'un de ces centres d'expérimentation développé sous l'impulsion d'un partenariat public-privé regroupant Cisco, TDC, Citelum et le Copenhagen Solutions Lab. Il a permis de tester des solutions comme le parking intelligent, les systèmes de mesure de la qualité de l'air ou encore de gestion de déchets.

Le *Copenhagen Solutions Lab* coordonne également des plateformes de données dans l'objectif de piloter les projets de la ville, certains acteurs considérant à ce sujet que les données constituaient le « potentiel d'affaires » du territoire.

Réseaux du futur

Note n° 4

Gestion dynamique du spectre

19 juillet 2019

Table des matières

Introduction.....	2
1 La nécessité du partage dynamique.....	2
1.1 Les mécanismes traditionnels d'accès au spectre	2
1.1.1 Autorisation dite « exclusive »	3
1.1.2 Autorisation générale.....	3
1.2 La nécessité de penser à des mécanismes plus flexibles	4
2 Le partage du spectre : vers des modèles de plus en plus élaborés	7
2.1 Les prémices : le mécanisme DFS (<i>Dynamic Frequency Selection</i>)	7
2.1.1 Concept	7
2.1.2 Difficultés d'implémentation.....	7
2.2 Le TV White Space : une potentielle réserve de basses fréquences.....	8
2.2.1 Concept	8
2.2.2 Cas d'implémentation	9
2.3 Le LSA (<i>Licensed Shared Access</i>) : un modèle de partage dynamique pensé pour les opérateurs mobiles	10
2.3.1 Concept	10
2.3.2 Cas d'implémentation	11
2.4 Le SAS (<i>Spectrum Access System</i>) CBRS.....	12
2.4.1 Concept	12
2.4.2 Comparaison SAS CBRS/LSA.....	15
3 Promouvoir le partage dynamique du spectre en France.....	16
3.1 Pourquoi ?	16
3.2 Comment ?	18

Introduction

Le spectre est une ressource rare ; il faut donc s'assurer que les choix d'affectation fassent en sorte qu'il soit utilisé de la meilleure manière possible. Ce sujet se pose avec de plus en plus d'acuité alors que les demandes d'accès au spectre pour de nouveaux besoins ne cessent de croître.

Si le partage de fréquences est déjà une réalité¹, l'approche des régulateurs se polarise souvent sur deux modèles : l'attribution de bandes de fréquences pour des usages exclusifs ou l'identification de bandes dites « libres ». Or, ces deux approches ont leurs limites. Les coûts d'accès à un spectre « dédié » sont généralement élevés. Quant aux bandes libres, elles peinent à être des solutions pour des usages nécessitant un minimum de garanties contre les brouillages et rendent plus difficile l'évolutivité de la gestion du spectre².

Plusieurs facteurs poussent par ailleurs à repenser l'approche actuelle : la pression sur l'accès au spectre, notamment pour des usages locaux, l'existence de zones où certaines bandes sont non utilisées et l'évolution des solutions de partage en réponse à ces constats. Deux défis sont en particulier à adresser pour le gestionnaire du spectre : penser plus local et plus dynamique, c'est-à-dire permettre un accès au spectre plus fin tant d'un point de vue géographique que temporel, et ainsi utiliser davantage le spectre là où il est sous-utilisé.

Les solutions de partage peuvent permettre d'y répondre à condition de trouver des cas d'usages et des modèles permettant à la fois de soutenir et protéger les investissements et autoriser d'autres usages. C'est la promesse des mécanismes de partage dynamique du spectre.

Le partage dynamique du spectre est au cœur des réflexions sur l'amélioration de l'usage du spectre depuis plusieurs années à présent. On peut citer à titre d'exemple le rapport « Une gestion dynamique du spectre pour l'innovation et la croissance »³ de Joëlle Toledano, datée de 2014, présentant plusieurs propositions de rupture afin de se saisir de ce nouveau mode d'usage du spectre.

L'objectif de cette note est de décrire les enjeux du partage dynamique du spectre, de rappeler l'évolution des solutions existantes et leur niveau de maturité pour enfin proposer des axes de réflexion pour la gestion de certaines bandes de fréquences.

1 La nécessité du partage dynamique

1.1 Les mécanismes traditionnels d'accès au spectre

Si le partage de fréquences est déjà largement une réalité, les modalités d'accès au spectre pour les bandes de fréquences affectées aux services de communications électroniques sont toutefois souvent polarisées entre un modèle dit « exclusif » et un modèle « libre sous autorisation générale ».

Tout d'abord, et pour des raisons notamment de bonne gestion du spectre, plusieurs bandes sont affectées à un usage particulier. La plupart des bandes pour la radiodiffusion, les transmissions satellite, les radars, etc. appartiennent à cette catégorie. Restreindre les autorisations à un seul type

¹ par exemple sous forme de partage géographique entre stations terriennes et faisceaux hertziens dans les bandes 11 et 18 GHz

² En effet, l'absence de contrôle sur les matériels déployés ne permet pas d'avoir l'assurance de la migration ou de l'extinction effective en cas d'évolution des conditions d'utilisation de la bande

³ <https://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/rapport-gestion-dynamique-spectre-2014-06-30.pdf>

d'usage permet de faciliter la coordination entre acteurs. En effet, les technologies concernées ayant des comportements similaires en matière de propagation, il devient plus simple de prévoir et ainsi d'éviter les interférences. Cette restriction est aussi nécessaire pour les cas d'usages présentant une extrême sensibilité aux technologies se comportant différemment (ex : radars) participant ainsi de la bonne gestion du spectre des fréquences. Dans ces bandes, l'évocation de solutions de partage avec d'autres usages suscite souvent des réactions très vives, car historiquement, les systèmes déployés l'ont été en supposant que les usages seraient toujours les mêmes.

Au-delà, les pratiques d'autorisation pour les services de communications électroniques se polarisent naturellement entre deux catégories : l'autorisation individuelle dite « exclusive » et l'autorisation générale.

1.1.1 Autorisation dite « exclusive »

Dans ce modèle, le titulaire d'une autorisation dispose, dans le respect du droit applicable, de droits privatifs sur une bande de fréquences dans une zone géographique donnée⁴ pour une durée usuellement longue (plusieurs années). Ainsi, même s'il doit se coordonner avec ses voisins (services en bandes adjacentes ou aux bordures géographiques de son autorisation), l'autorisation lui donne une garantie sur le périmètre de son autorisation contre les brouillages préjudiciables. Cela permet notamment au titulaire d'assurer une certaine qualité de service à ses transmissions.

C'est le modèle traditionnel des attributions des bandes de fréquences mobiles aux opérateurs (généralement via des procédures de sélection puisque la demande est supérieure au spectre disponible) car il permet de donner des garanties et de la visibilité pour des réseaux demandant des investissements importants et à long terme. C'est aussi le modèle utilisé aujourd'hui pour la TNT, les faisceaux hertziens (liaisons point à point), les réseaux mobiles professionnels, etc.

1.1.2 Autorisation générale

Le spectre sous autorisation générale désigne les bandes du spectre électromagnétique exemptes d'autorisation individuelle et dont les conditions techniques d'utilisation sont définies par le régulateur. Ainsi l'accès à ces bandes du spectre ne requiert pas de demande administrative, les utilisateurs de ces bandes restent cependant soumis aux conditions d'utilisation fixées par le régulateur. Ces contraintes techniques ont pour objectif de faciliter la coexistence des utilisateurs, elles fixent notamment des limites de puissance. La contrepartie de la simplicité d'usage de ces bandes est l'absence de garantie contre le risque de brouillage.

La présence de spectre sous autorisation générale et son succès avec le Wi-Fi a démontré que du spectre sans contrôle d'admission, sans garantie de non interférence peut avoir un impact social, sociétal et économique très positif en permettant l'émergence de services innovants⁵.

⁴ À noter qu'une autorisation privative n'est pas octroyée à titre exclusif : à titre d'exemple, la décision n° 2007-0683 modifiée de l'Arcep fixant les conditions d'utilisations de l'UWB permet l'utilisation de cette technologie dans des bandes concernées par des autorisations d'utilisation fréquences individuelles. Toutefois le titulaire a des garanties de protection et de non utilisation par des tiers très fortes.

⁵ On note toutefois que dans certaines zones (notamment en intérieur dans les centres urbains), les réseaux Wi-Fi se sont multipliés à un point que ce spectre est congestionné et que les performances des réseaux sont dégradées.

1.2 La nécessité de penser à des mécanismes plus flexibles

Certains acteurs intéressés par l'accès au spectre préfèrent des bandes libres et déclarent ne pas être intéressés par le modèle d'autorisation dite « exclusive ».

Les bandes libres, telles que les bandes Wi-Fi, peuvent satisfaire une partie des besoins de ces acteurs ; elles présentent cependant le désavantage pour eux de ne pas garantir de qualité de service. Par ailleurs, il est très compliqué opérationnellement de faire évoluer une bande sous un régime général vers un régime dit « exclusif », pour des raisons de brouillages résiduels.

Plusieurs acteurs estiment donc que pour voir émerger de nouvelles applications innovantes, il faudrait un système hybride, au-delà des deux modes d'accès au spectre évoqués plus haut. Ces nouveaux modes d'accès permettant de proposer notamment des autorisations secondaires avec des garanties de non brouillage à un coût moindre, dû à la diminution de la rareté. Selon les cas d'application et les technologies utilisées, il est également possible de garantir une qualité de service à certains des usagers.

De façon schématique, il s'agirait d'envisager davantage l'introduction dans des bandes déjà sous autorisations individuelles d'usages secondaires. Ces nouveaux usages seraient autorisés à condition que le type de bande rende cela opportun mais surtout que les titulaires d'autorisations aient des garanties fortes de protection contre toute interférence. Ces garanties conditionneraient les paramètres et les caractéristiques de ces nouveaux usages et seraient directement liées aux possibilités techniques et technologiques d'aujourd'hui.

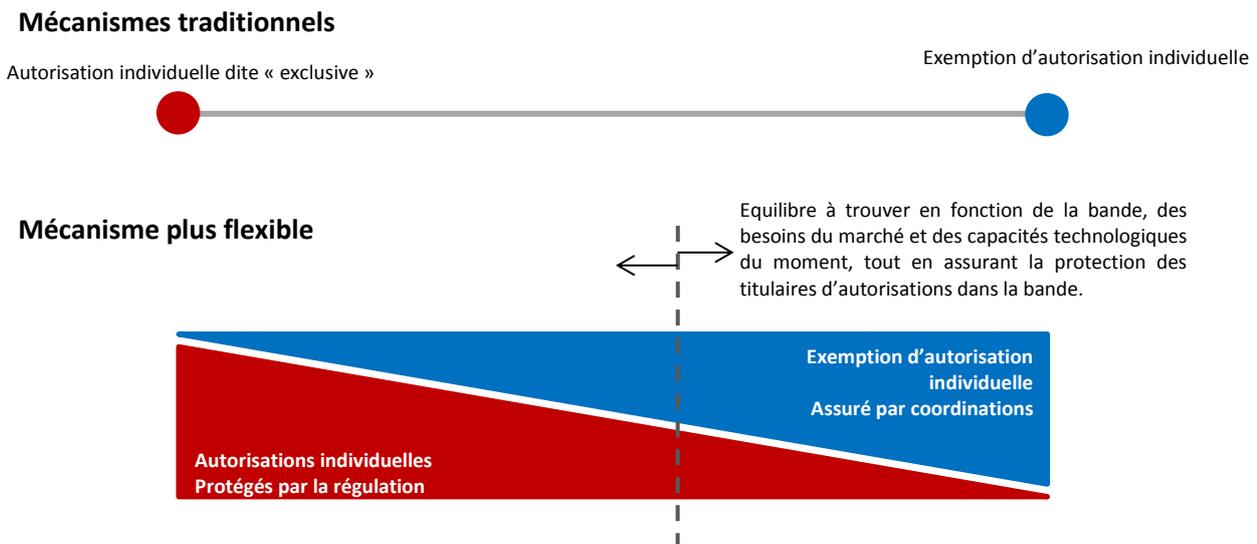


Figure 1: Nécessité de penser à des mécanismes plus flexibles entre les deux pôles de la vision traditionnelle de l'accès au spectre⁶

⁶ Adaptée d'une image fournie par Google

En matière de partage, on pourrait distinguer :

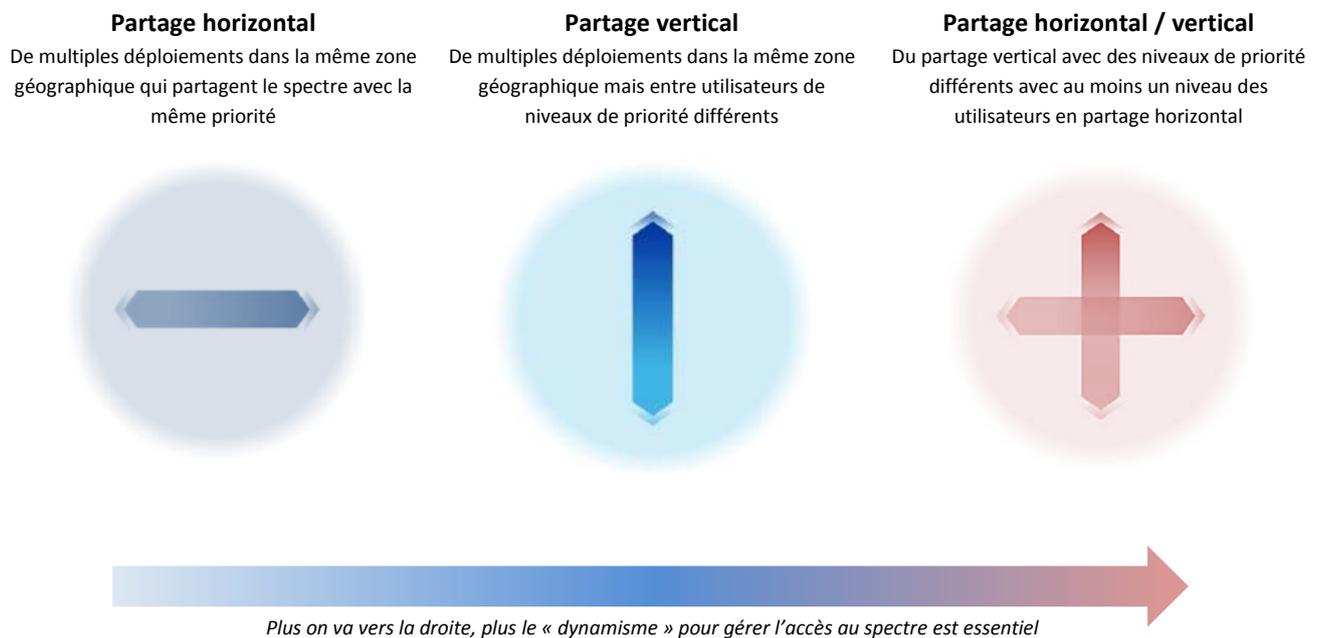


Figure 2 : Typologie de partages de fréquences

Partage de spectre « dynamique » ?

La présente note qualifie de mécanismes de partage de spectre dynamique, tout mécanisme permettant de tirer parti du fait que l'usage des fréquences par un titulaire d'une autorisation n'est pas effectif 100% du temps, pour 100% du spectre autorisé sur 100% de l'espace géographique qui lui est alloué.

Le tableau ci-dessous précise plusieurs des notions utilisées dans la présente note :

Mode de partage du spectre	Essaie-t-on de savoir si le spectre est utilisé par l'utilisateur primaire? ⁷	Mode de connaissance du spectre disponible	Gestion de la coexistence entre les utilisateurs dans la bande
Statique	Non	N/A	Par des paramètres techniques figés et fixés d'avance (ex : niveau de puissance) et/ou applications géographiques séparées (ex : indoor/outdoor)
Dynamique	Oui ⁸	Écoute de la bande grâce à des capteurs (<i>spectrum sensing</i>) ⁹	
		Déclaratif	<p>Humain : l'utilisateur renseigne des données d'usage à la main via une interface web ou dans une base de donnée (ex : calendrier de disponibilité)</p> <p>Machine to machine : la station de base ou l'outil émetteur qui utilise le spectre envoie l'information à la base de données</p>
			Grâce à l'application de règles dictées par le modèle de partage et les informations disponibles.

Tableau 1 : Notions de partage de spectre

Le partage dynamique du spectre est indispensable pour permettre le partage vertical (plusieurs utilisateurs se partageant la même bande sur un lieu donné) afin de protéger les utilisateurs de niveau supérieur (en termes de priorité d'accès) des utilisateurs de niveau inférieur.

Les différents modes de partage dynamique vont ainsi se distinguer par le mode de connaissance de disponibilité du spectre (qui vise avant tout à protéger le ou les utilisateurs primaires) mais aussi et surtout par le moyen d'implémentation défini.

Le partage dynamique du spectre : solution à tout ?

Le partage dynamique du spectre, bien que de plus en plus utile pour penser à de nouveaux types d'usage du spectre, ne peut s'appliquer dans tous les cas. Des acteurs estiment ainsi par exemple que concernant les bandes basses (< 1 GHz) et pour les services demandant une couverture de l'ensemble du territoire, le modèle d'autorisation dite « exclusive » reste le plus adéquat : d'une part car les investissements consentis pour la couverture nationale doivent être sécurisés par l'investisseur qui acquiert les droits d'utilisation, d'autre part pour des raisons de maîtrise du réseau

⁷ Avant utilisation par l'utilisateur secondaire

⁸ Nota bene : le partage dynamique peut aussi exister en l'absence d'utilisateur primaire.

⁹ Ces deux approches (capteurs et déclaratif) ne sont pas exclusives et peuvent-être utilisées conjointement

et de la qualité de service en lien avec les caractéristiques de propagation propres à ces bandes basses. Tous les systèmes de partage ne permettent pas non plus de répondre à certains problèmes des bandes libres, notamment les systèmes offrant une priorité stricte à l'utilisateur primaire ne permettent pas aux utilisateurs secondaires de garantir un service.

Il revient au régulateur de prendre en compte les spécificités de chaque bande / chaque usage lorsqu'il définit le modèle d'accès au spectre.

2 Le partage du spectre : vers des modèles de plus en plus élaborés

2.1 Les prémices : le mécanisme DFS (*Dynamic Frequency Selection*)

2.1.1 Concept

Le modèle DFS (*Dynamic Frequency Selection*) est un modèle de partage de spectre qui a été développé conjointement par l'industrie Wi-Fi et les utilisateurs de radars dans la bande Wi-Fi 5 GHz.

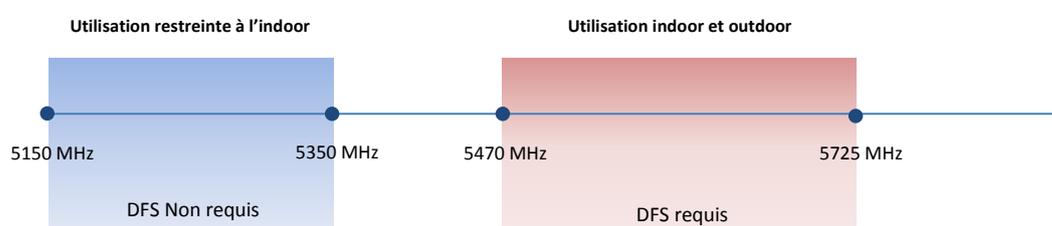


Figure 3 : Canaux accessibles au Wi-Fi en bande 5GHz en France

En effet dans cette bande, les utilisateurs Wi-Fi doivent cohabiter avec les utilisateurs primaires historiques de la bande. Ces utilisateurs historiques sont les radars météo, les radars militaires, la surveillance maritime et la radionavigation aéronautique. Des contraintes de partage ont été mises en place pour les protéger.

Pour cela, un DFS AP (*DFS Access Point* – point d'accès implémentant le mécanisme DFS) est requis. Ce point d'accès est chargé de détecter une éventuelle présence d'un signal radar¹⁰ lorsque le Wi-Fi veut accéder initialement à un canal de la bande et de refaire des vérifications régulières périodiques après son accès à la bande. Si un radar est détecté, le DFS AP doit libérer le canal et ne pas y revenir avant un certain laps de temps.

2.1.2 Difficultés d'implémentation

En pratique, détecter des signaux radar est difficile, à cause de la variété des signatures de signaux radar et de la nature des pulsations courtes émises par les radars. Ces difficultés conduisent à l'observation de faux positifs où un DFS AP semble identifier un signal radar alors qu'il n'y en a pas. Ces faux positifs peuvent être dus à de l'interférence co-canal d'un DFS AP distant agissant dans le

¹⁰ Les radars fonctionnent en émettant de courtes mais puissantes pulsations à fréquence régulière dans l'environnement. Quand ces pulsations rencontrent un obstacle, l'énergie de ces pulsations est dispersée et une partie de cette énergie retourne à l'émetteur du système radar. L'émetteur peut ainsi calculer à partir des différences en temps et en fréquence entre l'émission et le signal retour, la distance de l'obstacle et d'autres informations utiles. Ainsi, tout signal non synchronisé sur la fréquence d'un radar brouille le fonctionnement de ce dernier.

même canal ou encore à des conditions transitoires dues à une haute densité d'utilisateurs dans la bande.

Points saillants du modèle

- Le DFS introduit un principe d'autorisation générale pour des utilisateurs secondaires avec l'objectif de protéger les utilisateurs primaires de la bande (radars...). Ses limites techniques sont dues aux congestions du système, inévitables, qui entraînent une multiplication de faux positifs dans la détection des radars.
- Les utilisateurs primaires n'exercent pas de contrôle d'admission. Leur protection est dépendante du bon fonctionnement des équipements accédant au réseau et de la bonne application de la réglementation. Ainsi, si un équipement défectueux implémente un DFS AP qui indique qu'il n'y a pas de radar alors qu'il y en a (probabilité de non détection importante), il nuira aux utilisateurs primaires (radars).

2.2 Le TV White Space : une potentielle réserve de basses fréquences

La bande radio UHF (470 – 698 MHz, canaux 21 à 69 – canaux de 8 MHz) utilisée pour la diffusion TV présente des propriétés de propagation très intéressantes : elles permettent de couvrir de larges zones et l'intérieur des bâtiments avec un faible nombre de sites. Cette bande a suscité, dès 2007, beaucoup d'intérêt pour d'autres usages dans la mesure où tous les canaux ne sont jamais utilisés en même temps dans une zone donnée. Ces canaux sont appelés espaces blancs ou *white spaces*. L'idée était de chercher à les utiliser pour des équipements de faible puissance de manière opportuniste sans brouiller la diffusion TV.

Depuis 2009, plusieurs expérimentations ont été menées et ont permis, notamment, dans certains pays, d'apporter un service d'accès à internet de qualité dans des zones reculées. Cependant la coexistence dans cette bande reste complexe et ces expérimentations n'ont pas permis à ce jour de faire émerger un écosystème.

2.2.1 Concept

Le modèle théorique du TV White Space (TVWS) repose sur l'utilisation de l'une ou des deux méthodes de détection d'utilisation du spectre suivantes afin de prévenir toute interférence avec la diffusion TV : la géolocalisation et le *spectrum sensing* (détection d'utilisation du spectre). Les informations concernant cette détection d'utilisation du spectre sont consignées dans une base de données et consultables par tout équipement souhaitant accéder au spectre. Ainsi :

- les utilisateurs primaires (équipements TV broadcast et équipements PMSE¹¹ autorisés à utiliser les canaux inoccupés par la diffusion TV) s'enregistrent dans la base de données en fournissant leurs caractéristiques en matière d'émission ;
- les utilisateurs secondaires souhaitant accéder au spectre envoient une requête à la base de données. Leur requête comprend leur propre information de localisation ainsi que les paramètres du transmetteur de l'équipement ;
- une zone de protection de l'utilisateur primaire est calculée et enregistrée dans la base. Les modèles de propagation prennent en compte les paramètres de l'utilisateur primaire pour leurs calculs. L'utilisateur souhaitant accéder au spectre reçoit la liste des canaux disponibles localement et des conditions techniques associées, telles que la puissance maximum permise pour chaque canal.

¹¹ Equipements PMSE : *Programme Making and Special Events*. Ex : microphones sans fils, certaines caméras vidéo mobiles, etc.

Le modèle permet ainsi une utilisation opportuniste et dynamique tout en protégeant les utilisateurs historiques primaires de la bande.

Dans la pratique :

- tout accès par géolocalisation requiert que les équipements TVWS déterminent leur propre localisation physique et évitent les utilisateurs primaires à proximité. La méthode a été élaborée de façon plus efficace que dans le cas du DFS : les équipements TVWS opèrent seulement après avoir reçu la permission de la base de données, et peuvent être contraints à s'éteindre s'il y a un risque d'interférence ;
- concernant le *spectrum sensing* il a été prévu dans la définition théorique du modèle mais jugé insuffisamment fiable aujourd'hui¹².

Points saillants du modèle

- Contrairement au mécanisme DFS, ce modèle permet de gérer les cas d'interférence, notamment grâce au contrôle d'admission au spectre par la base de données
- Cependant ce contrôle d'admission se gère de façon bilatérale (entre l'utilisateur primaire et l'utilisateur cherchant à accéder au spectre). La base de données n'est pas une représentation exacte de l'environnement, ce qui ne permet pas, notamment, d'assurer que le niveau de bruit en canal adjacent ne dépasse pas un seuil préjudiciable au bout d'un moment pour les utilisateurs primaires. En effet plusieurs nœuds peuvent être acceptés à proximité d'une victime en réception rehaussant l'un après l'autre le niveau de bruit général dans la zone.
- Si ce mode (ne prenant pas en compte les effets cumulatifs d'interférence) limite la complexité de la base de données, il nécessite pour protéger autant que possible les utilisateurs primaires, d'imposer des limitations de puissance reflétant parfois des cas extrêmes où un nombre important de nœuds se situe aux alentours d'un utilisateur primaire, même si ce n'est pas le cas en réalité. Cette mesure n'est donc pas satisfaisante pour les deux parties prenantes : la puissance de transmission des utilisateurs secondaires peut être réduite plus que nécessaire, et malgré tout, les utilisateurs primaires ne peuvent être assurés d'être complètement protégés.

2.2.2 Cas d'implémentation

De nombreuses initiatives ont vu le jour (où sont en cours de déploiement dans le monde) implémentant les principes du TV White Space. On peut citer :

- L'initiative de Microsoft « *Microsoft Airband initiative : Connecting Rural America* » aux USA : Microsoft ambitionne en développant la connectivité en zone rurale de développer l'usage du *cloud* chez plus d'habitants et chez certains verticaux d'intérêts tels que l'agriculture, l'éducation et la santé. Microsoft espère que grâce à la norme 802.11af (pour laquelle ils développent un *chipset*) ils pourront créer un « super WiFi en bande UHF » (pour cela un écosystème d'équipements doit éclore dans la bande).
- De même l'OFCOM avec le programme « *implementing TV White Space* » vise depuis 2015 à offrir de la connectivité en zone rurales et reculée. Pour cela une base de données TVWS gérée par Nominet¹³ a été créée.

¹² Car : **1.** difficile de gérer les périodes veille où l'équipement peut déclarer un canal comme étant libre alors qu'il est occupé particulièrement dans les cas d'obstructions par des collines, des immeubles, des arbres, etc. **2.** dans certains cas les transmissions peuvent être de très faibles durée et il devient difficile de détecter les transmissions et éviter les interférences, etc.). Source : TVWS : A pragmatic approach https://www.researchgate.net/publication/261053226_TV_White_Spaces_a_pragmatic_approach - page 26

¹³ Même les microphones PMSE y seraient déclarés

Des acteurs estiment que le concept du TV White Space permet de répondre efficacement à des cas d'usage précis nécessitant de la couverture. Les bandes UHF s'y prêtent bien grâce à leurs excellentes propriétés de propagation. Mais l'absence d'un écosystème florissant et les faibles largeurs de bande disponibles (qui peuvent en plus être préemptées à tout moment pour la TV) expliquent le faible succès de cette technologie à l'international malgré quelques initiatives. Ainsi d'après eux, le mécanisme gagnerait à être importé vers d'autres bandes.

En France, des expérimentations sont menées depuis quelques mois par les sociétés Nomotech et Microsoft dans le Gers avec l'accord préalable du CSA. Si les résultats semblent encourageants en termes de débits obtenus et de couverture, quelques contraintes subsistent :

- la non-stabilité des canaux de fréquences TV disponibles : à petite échelle, par exemple une commune, les canaux de fréquences disponibles sont identiques mais à l'échelle d'un département les canaux varient d'une localité à une autre compliquant le déploiement ;
- Une fois les déploiements faits, la gestion de brouillage aux frontières des zones reste complexe, en particulier à cause des bonnes propriétés de propagation de ces bandes.

On peut par ailleurs s'interroger sur ce qui serait arrivé si ce type d'usages avait été autorisé et s'était développé par le passé avant qu'une partie de la bande utilisée pour la TNT soit attribuée aux opérateurs mobiles pour répondre aux enjeux de couverture mobile dans les zones rurales. L'implémentation de mécanismes de partage n'est ainsi pas neutre pour l'évolutivité de l'utilisation d'une bande donnée, puisqu'ils compliquent les réaménagements en multipliant les acteurs. Cependant, à la différence des autorisations générales, les systèmes de partage avec contrôle d'accès permettent de s'assurer que les équipements n'émettent plus en cas d'évolution de la bande permettant de protéger les nouveaux utilisateurs.

2.3 Le LSA (*Licensed Shared Access*) : un modèle de partage dynamique pensé pour les opérateurs mobiles

2.3.1 Concept

Le concept de LSA a été initialement introduit par le groupe européen de politique spectre (RSPG)¹⁴ en 2011 dans son rapport « *Report on Collective Use of Spectrum and other spectrum sharing approaches* ». Le but du rapport était d'explorer toutes les approches possibles en matière d'implémentation ou d'amélioration du cadre réglementaire en matière de modèles de partage de spectre innovant en Europe.

Le RSPG a ainsi recommandé aux Etats membres de l'Union européenne dans ce rapport de se diriger vers des approches plus « dynamiques » du partage du spectre tout en concluant que :

- une grande partie du spectre était déjà partagée entre différentes applications et qu'il n'y avait pas à ce moment-là de besoin identifié de spectre dédié supplémentaire ;
- que néanmoins, il y avait un besoin d'évoluer vers des mécanismes plus appropriés de partage de spectre afin de favoriser une utilisation plus efficace de ce dernier ;
- ainsi le rapport a introduit le concept de LSA, censé pouvoir fournir de nouvelles opportunités de partage de spectre à l'échelle européenne sous un régime sous autorisation, tout en maintenant les usages existants de spectre pour lequel un déplacement en fréquences (réaménagement ou *refarming*) n'était pas envisageable.

¹⁴ Groupe chargé de conseiller la Commission européenne sur la gestion des fréquences.

À la suite de ces recommandations, le LSA a été défini à l'ETSI¹⁵ et le rapport ECC 205 a été approuvé en février 2014 par la CEPT¹⁶. Ce rapport décrit comment le LSA peut être implémenté pour le cas d'usage d'application des réseaux mobiles large bande, particulièrement dans la bande 2,3-2,4 GHz définie au niveau UIT comme étant une bande mobile mais occupée dans certaines parties du monde (en Europe notamment) par d'autres utilisateurs.

Dans le modèle de partage de spectre LSA, les ressources spectrales vacantes peuvent être allouées à des utilisateurs qui souhaitent accéder au spectre, ces utilisateurs sont appelés des licenciés LSA. Ainsi, le LSA implémente un partage de spectre entre deux ensembles d'utilisateurs : un premier ensemble constitué des utilisateurs historiques ou primaires de la bande et un deuxième destiné aux licenciés LSA.

L'architecture du modèle se fonde sur les deux éléments principaux suivants :

- le **LSA Repository** : ce répertoire contient les informations sur l'utilisation du spectre par les utilisateurs historiques primaires (informations en espace, fréquences et temps). Il désigne également l'arbitre du modèle, implémentant les conditions techniques du mécanisme de partage. Il contient les détails des contrats passés entre le régulateur, les utilisateurs primaires historiques de la bande et les utilisateurs secondaires ayant obtenu des autorisations. En fonction de tous ces paramètres, le LSA Repository détermine, grâce à un algorithme prédéfini, le spectre disponible.
- le **LSA Controller** : il a pour rôle de gérer l'accès au spectre par l'utilisateur secondaire. Cet élément détient les informations de déploiements réels et donc la topologie du réseau de ce dernier. Il s'assure que le réseau de l'utilisateur secondaire respecte les règles définies par le *LSA Repository*. Celui-ci est localisé dans l'infrastructure de l'utilisateur secondaire.

En pratique : pour fonctionner, le modèle LSA a besoin d'avoir des informations sur les déploiements réels des réseaux dont l'accès au spectre va être géré. Très tôt dans le développement, la nécessité que ces informations ne soient pas accessibles aux autres participants est apparue. Ceci a abouti à un modèle d'architecture avec une base de données divisée en deux parties (le *LSA repository* et le *LSA controller*). Il y a dans un tel modèle au moins autant de *LSA controllers* que d'opérateurs/utilisateurs secondaires souhaitant accéder à la bande. Les données sur les utilisateurs secondaires n'étant pas partagées, le modèle exclut un partage dynamique de fréquences entre eux. Sur une zone donnée, chaque fréquence ne peut être attribuée qu'à un seul utilisateur secondaire. Cette répartition est définie à l'avance et ces informations sont stockées dans le LSA Repository.

2.3.2 Cas d'implémentation

De nombreux tests du mécanisme LSA ont été faits en Europe¹⁷ en bande 2,3 – 2,4 GHz. La bande a notamment été étudiée en 2014 en France, où elle est utilisée en partie par le ministère chargé de la défense. , mais ces études n'ont pas abouti à des implémentations en vraie grandeur.

Avec la démocratisation des réseaux de types LTE (4G) pour des usages professionnels et les besoins des verticaux, le LSA pourrait répondre aujourd'hui à de nouveaux types de besoins.

Une version évoluée du LSA, *enhanced LSA*, est en cours de définition à l'ETSI¹⁸. Cette évolution permettra un système de leasing (location) automatique via des interfaces en cours de

¹⁵ European Telecommunications Standards Institute (Institut européen des normes de télécommunications)

¹⁶ Conférence Européenne des postes et des télécommunications

¹⁷ <https://www.cept.org/ecc/topics/lisa-implementation>

¹⁸ Les travaux impliqueraient à minima Nokia, Ericsson, Red technologies et SennHeiser

standardisation, elle ne nécessitera plus une attribution secondaire en modèle dit « exclusif » et permettra donc un système de partage dynamique entre utilisateurs secondaires.

2.4 Le SAS (Spectrum Access System) CBRS

Parallèlement au concept de LSA qui était en cours de développement en Europe, le concept de SAS (*Spectrum Access System* – Système d'accès au spectre) CBRS (*Citizens Broadband Radio Service*) a été développé aux États-Unis. Ce concept implémente un troisième niveau d'accès au spectre en plus d'utilisateurs dits « historiques » et d'utilisateurs dits « prioritaires » (deuxième niveau).

2.4.1 Concept

Historiquement, la bande 3550 – 3700 MHz était utilisée aux États-Unis par l'US Navy et le Département de la Défense – DoD - (principalement par des radars maritimes et terrestres). Les usages concernés sont cependant occasionnels et géographiquement limités. C'est pourquoi, en 2015, le régulateur américain, la FCC (Federal Communications Commission) a lancé un projet d'autorisation de l'utilisation de la bande en partage. Le projet et la bande prendront le nom de CBRS : *Citizen Broadband Radio Service*.

Le modèle envisagé par la FCC pour cette bande est un modèle de partage de fréquence vertical entre différents utilisateurs avec 3 niveaux de priorité (on parle de *Tier*) :

- **Le Tier 1 (*Incumbents*)** : C'est le Tier des utilisateurs historiques qui ont les droits absolus dans la bande. Ils ont le droit de préemption sur toute la bande dès qu'ils ont besoin du spectre et doivent absolument être protégés lors de leurs opérations. L'intérêt des utilisateurs historiques réside ici essentiellement dans le fait qu'ils pourront rester dans la bande malgré leur sous-utilisation de cette dernière.
- **Le Tier 2 (*Priority Access Licence*)** : C'est le Tier des utilisateurs prioritaires : une autorisation est accordée par bloc de 10 MHz localement (unité géographique définie par la FCC : le comté) ; elle permet à son titulaire d'avoir la priorité sur les utilisateurs du *Tier* inférieur. En cas d'apparition d'un utilisateur du Tier 1 souhaitant utiliser le bloc, un autre bloc doit leur être réalloué dans la limite des blocs laissés libres. Ce Tier est intéressant pour les opérateurs qui souhaitent garantir leurs investissements en ayant un minimum de certitudes quant au spectre disponible localement pour leur besoin. En effet en l'absence d'utilisateurs de Tier 1, dont l'usage est ponctuel, l'utilisateur aura au moins accès à la quantité de spectre donnée par son autorisation. Dans chaque unité géographique (comté), il pourra être attribué localement jusqu'à 70 MHz (40 MHz à un seul utilisateur) sur la plage de fréquence 3550 - 3650 MHz, par un processus d'enchère à définir. Les autorisations actuelles envisagées par la FCC sont des autorisations de 10 ans, renouvelables, accordées selon le principe du « *Use it or Share it*¹⁹ ».
- **Le Tier 3 (*General Authorized Access*)** : C'est le Tier des utilisateurs exemptés d'autorisation individuelle. Ce Tier implémente une sorte de partage horizontal dans la mesure où tous les utilisateurs ont accès au spectre à égalité de droit. Les fréquences non utilisées par les tiers supérieurs sont partagées équitablement entre les utilisateurs du Tier 3. Ce Tier est censé permettre, à l'image des bandes sous autorisation générale telle que les bandes Wi-Fi, de favoriser l'innovation. Compte tenu du maximum de 70 MHz attribuable localement pour le

¹⁹ Le spectre est disponible pour le Tier 3 tant qu'aucune installation ni émission n'est concrètement faite par le Tier 2 détenteur de licence

Tier 2, il reste par localité un minimum de 80 MHz disponible en accès libre (sauf présence d'utilisateurs du Tier 1).

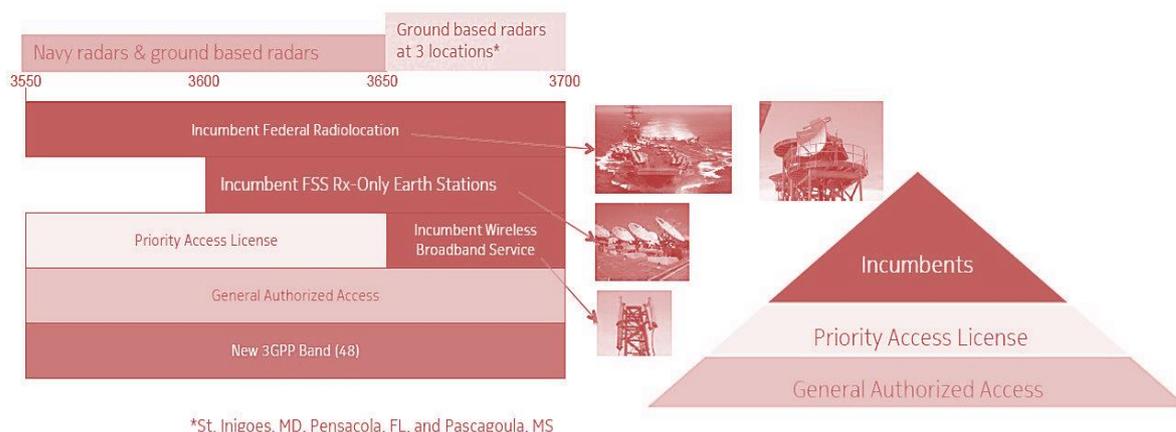


Figure 5 : la Citizens Broadband Radio Service²⁰

Ce modèle est basé sur les interactions de trois types d'équipements :

- **Les SAS (*Spectrum Access System*)** : Ce sont des bases de données centralisées contenant les informations d'utilisation du spectre de toutes les unités géographiques de tous les Tiers. Elles comprennent aussi les informations sur les zones de protection de certains utilisateurs historiques tels que les sites de stations terriennes du service fixe par satellite ou celles des opérateurs sans-fil large bandes autorisés historiquement.
- **L'ESC (*Environmental Sensing Capability*)** : c'est un ensemble de capteurs qui sont en mesure de détecter les usages des fréquences par les utilisateurs historiques (radars maritimes approchant les côtes) et qui alertent les SAS afin que les canaux occupés par les Tiers inférieurs soient libérés.
- **CBSD (*Citizens Broadband radio Service Device*)** : Il s'agit des stations et terminaux utilisateurs qui communiquent dans la bande de fréquence 3550-3700 MHz²¹. Ils sont classés en trois catégories :
 - o catégorie A CBSD : il s'agit des points d'accès, des femtocells, et stations de base basse puissance destinés à des usages à l'intérieur des bâtiments, mais pouvant être utilisés en extérieur à une hauteur maximum de 6 m et une PIRE maximum de 30 dBm ;
 - o catégorie B CBSD : pour des usages extérieur uniquement, ils peuvent avoir une PIRE allant jusqu'à 47 dBm ;
 - o terminal utilisateur (EUD) : 23 dBm de PIRE maximum, pas de *peer to peer* possible.

Les CBSD de catégorie A et B doivent respecter les conditions suivantes :

- o fournir leur localisation avec une précision de +/- 50 m en horizontal et +/- 3 m en vertical et rapporter leur nouvelle localisation dans les 60 secondes en cas de mouvement ;
- o être installés par des installateurs professionnels qualifiés²² ;

²⁰ Source image : Nokia

²¹ Bande harmonisée au 3GPP : Band 48, standardisée pour favoriser un écosystème répondant aux caractéristiques définies par le CBRS telles que la définition de paramètres spécifiques plus strictes des émissions hors bandes afin de protéger les équipements du DoD

- de respecter une instruction donnée par un SAS dans les 5 minutes après réception de l'instruction.

En pratique :

Des interfaces de communications entre les différents SAS ont été standardisées avec le concours de l'industrie via les institutions WinnForum/CBRS Alliance de façon à permettre la coexistence de divers constructeurs de SAS. Ces constructeurs de SAS sont certifiés par la FCC qui s'assure que leurs solutions répondent bien au cahier des charges défini pour le fonctionnement du modèle. Les constructeurs SAS en phase finale de certification sont Google, Federated Wireless, Sony, Amdocs en partenariat avec Red Technologies, Commscope. D'autres intervenants devraient être certifiés au cours d'une seconde vague (Nokia, Red Technologies seul, etc.). Ces SAS se synchronisent les uns aux autres tous les soirs de façon à avoir les mêmes informations ;

Afin d'avoir un droit d'accès au spectre CBRS, un CBSD envoie une requête à un SAS avec les informations nécessaires (coordonnées GPS, hauteur d'antenne, catégorie de CBSD, indication si licence prioritaire PAL, ID FCC, etc.). Le SAS évalue les possibilités dans l'unité géographique considérée et, si des fréquences sont disponibles, communique au CBSD le canal sur lequel opérer ainsi que les paramètres techniques à respecter (puissance maximale, etc.). Pendant son fonctionnement, le CBSD est tenu de respecter toute instruction du SAS telle qu'une requête de changement de canal/fréquence, une requête d'ajustement du niveau de puissance, etc.

Si la FCC a défini des règles strictes pour la protection du Tier 1 et du Tier 2 telles que des modèles de propagation à utiliser, les éléments de coexistence et de gestion du Tier 3 ont été laissés aux constructeurs SAS qui y déploient des solutions propriétaires. Les constructeurs de SAS ont ainsi l'opportunité d'innover et de se différencier dans leur solution à ce niveau-là.

Les constructeurs SAS se rémunèrent en faisant payer aux utilisateurs du Tier 3 des frais d'abonnement à leur plateforme. Ces frais ne sont pas fixés par la FCC et chaque constructeur définit librement ses prix. Les utilisateurs choisissent librement le SAS qu'ils souhaitent utiliser.

Radio cognitive

Les nombreux acteurs interrogés par l'Arcep sur le sujet de la radio cognitive ont été unanimes sur le fait que bien que les travaux sur le sensing et la radio cognitive en général étaient prometteurs, la technologie restait assez immature pour l'instant en plus de rajouter de la complexité. De leur point de vue l'utilisation d'une base de données couplée à de la géolocalisation est la meilleure solution à ce jour pour gérer de façon suffisamment efficace le partage dynamique du spectre.

Facteurs qui ont fait émerger le CBRS aux États-Unis

Selon plusieurs acteurs interrogés, les facteurs qui ont favorisé l'émergence du CBRS sont les suivants :

- aux États-Unis contrairement à l'essentiel des pays dans le monde, la bande 3,4 - 3,8 GHz est utilisée pour des usages sensibles relevant de la défense, particulièrement difficiles à déplacer en fréquences ;
- il y avait une forte demande du marché pour des solutions de ce type et la présence et l'intérêt d'acteurs puissants capables de faire émerger des solutions et un écosystème. En effet, les États-Unis ont jusqu'ici eu beaucoup de difficultés à trouver des solutions efficaces pour la

²² Dans les règles définies par la FCC, les déploiements requiert le recours à des installateurs professionnels pour le déploiement de la majorité des équipements. Ceci afin de s'assurer que les règles définies par les mécanismes sont bien appliquées.

couverture des zones rurales. Il existe aussi par ailleurs beaucoup de demandes pour la couverture des entreprises à l'intérieur des bâtiments avec des acteurs indépendants ainsi que des demandes d'accès au spectre pour des verticaux.



Figure 7 : membres de la CBRS Alliance impliqués dans la définition du CBRS

2.4.2 Comparaison SAS CBRS/LSA

En première approche, le LSA correspond aux deux premiers tiers du SAS CBRS.

Une des différences majeures est le fait que dans le concept du SAS CBRS, la protection des utilisateurs historiques est assurée même si ces derniers ne peuvent pas fournir l'information de leur emplacement, beaucoup trop sensible pour être stockée dans une base de données.

	LSA	SAS CBRS
Niveaux de priorité	Système de partage vertical à deux Tiers	Système de partage combiné vertical /horizontal à trois Tiers
La base de données	Bases de données multiples ²³	Bases de données synchronisées ²⁴
Utilisation du spectre	Modèle initialement pensé pour du leasing moyen/long terme de spectre avec un maximum de garantie donnée aux utilisateurs secondaire. Le titulaire d'autorisation secondaire est protégé contre les brouillages (sauf éventuels utilisateurs primaires) sur une partie du spectre.	Inclut un Tier 3 – autorisation générale qui renforce les possibilités d'utilisation du spectre. De plus, le recours à une base centrale indépendante des réseaux souhaitant accéder au spectre permet d'envisager des accès au spectre plus dynamiques.
Complexité	Plus facile et rapide à mettre en œuvre grâce à un mécanisme existant par-dessus un écosystème existant	Assez complexe à implémenter, notamment avec l'introduction du <i>sensing</i> et nécessite le développement d'un écosystème spécifique
Adaptabilité	Focus initial sur l'Europe et facilement adaptable dans le reste du monde	Focus US, nécessite des adaptations pour implémenter dans les autres régions.

3 Promouvoir le partage dynamique du spectre

3.1 Pourquoi ?

Pour améliorer l'utilisation du spectre

L'une des missions de l'Arcep est de veiller à l'utilisation et la gestion efficaces des fréquences dont elle est affectataire. Le partage du spectre est l'un des mécanismes qui permet de promouvoir cette utilisation efficace des fréquences.

Le partage du spectre existe déjà dans les faits. Jusqu'ici, on observe notamment du [partage horizontal](#) (**exemple** : bande Wi-Fi 2,4 GHz) ou [statique vertical](#) lorsque le TNRBF le permet (**exemple 1** : des dispositifs médicaux courte portée autorisés à fonctionner en bande 2483,5 - 2500 MHz mais ne pouvant prétendre à protection et ne devant pas brouiller le service mobile par satellite dans le sens espace-Terre / **exemple 2** : les PMSE caméra vidéo autorisés dans la bande 2,3 – 2,4 GHz du ministère chargé de la défense / **exemple 3** : les faisceaux hertziens et les stations terriennes dans les bandes 11 GHz et 18 GHz.).

Cette cohabitation, notamment verticale, est rendue possible grâce à l'application de règles strictes et contraignantes telles qu'une limitation des puissances d'émission par les utilisateurs tolérés ou des limitations d'usage dans certaines zones. Ce type de contrainte limite les applications possibles et ne tient pas compte de l'utilisation effective du spectre par les utilisateurs primaires. Le partage dynamique puisqu'il prend en compte l'utilisation précise des utilisateurs primaires peut permettre d'accroître l'utilisation globale du spectre.

²³ Séparation en plusieurs composants : un LSA Repository et des LSA Controllers

²⁴ Les multiples SAS (de différents constructeurs) sont synchronisés simulant tous ensemble une base de données unique centralisée

Un certain nombre de bandes de fréquences pourraient susciter suffisamment d'intérêt pour que l'étude de l'introduction de tels mécanismes de partage soit considérée. Il s'agit notamment :

- de bandes pour lesquelles il existe des utilisateurs historiques mais dont l'utilisation est aujourd'hui concentrée sur certaines périodes ou zones géographiques ;
- de bandes hautes qui offrent des propriétés de propagation (faible portée) et des caractéristiques de bande (canaux plus larges) permettant d'envisager des applications relativement localisées, opportunistes, temporaires ou ponctuelles ;
- La bande 6 GHz qui abrite des faisceaux hertziens et pour lesquelles une introduction du Wi-Fi est à l'étude.

Il pourrait être envisagé, grâce à l'accès à ces bandes :

- d'apporter des solutions complémentaires pour le *public safety* (sécurité publique/PPDR – *Public Protection and Disaster Relief*) en France;
- proposer des solutions supplémentaires de réseau privé LTE/5G pour les besoins de l'industrie 4.0 ;
- favoriser l'innovation en réduisant la barrière à l'entrée pour les acteurs souhaitant disposer d'un accès à du spectre de qualité non licencié (en dehors des bandes sous autorisations générales type Wi-Fi).

C'est pourquoi il est intéressant de regarder pour chaque cas si et comment un partage serait possible et opportun. Les limites à l'exercice tiennent notamment à la complexité et au coût des solutions possibles, aux besoins de protection des investissements de certains titulaires d'autorisations ou à leurs droits à date ou encore au besoin de maintenir une certaine évolutivité de ces bandes de fréquences au-delà de l'usage qui en est fait aujourd'hui.

Pour mieux gérer la coexistence entre réseaux en partage horizontal

La gestion et l'application de critères de coexistence de réseaux en partage pourrait gagner en efficacité en cas de mise en place de plateformes implémentant les principes de partage dynamique. En effet, en plus de permettre un modèle à deux niveaux d'accès dans la bande, un système de base de données dynamique aiderait à gérer la coexistence entre les réseaux autorisés (identification et position exacte des stations émettrices, application de modèle de propagation en fonction de la position et de la réalité des émissions, prise en compte des critères de négociations entre partenaires qui peuvent évoluer plus facilement et rapidement, etc.).

Les questions de sensibilité des données à partager et le risque d'introduire des complications dans l'exploitation des réseaux doivent cependant être considérés avant la mise en place de telles solutions.

Pour une gestion administrative plus dynamique pour certaines applications

L'implémentation d'une solution de partage dynamique sous l'une des formes présentées (LSA, CBRS, etc.) ou sous une forme proche ferait intervenir une base de données qui renfermerait un certain nombre d'informations (contexte local, profil utilisateur, autorisation Arcep, etc.) et une forme d'intelligence (sous forme d'algorithme) permettant de traiter de façon rapide et efficace les demandes d'accès au spectre notamment pour ce qui est des utilisations ponctuelles et locales. Ces systèmes pourraient ainsi se charger d'attribuer des autorisations numériques d'émettre ainsi que de vérifier l'application de règles de cohabitation définies par le régulateur en fonction de paramètres techniques et géographiques à un instant donné. **Exemple:** Gestion des attributions de fréquences locales pour les besoins PMSE (*Programme Making and Special Events*) pour les grands évènements.

Pour chaque bande où ce système pourrait être introduit il faudra évaluer les gains de cette automatisation, le coût de sa mise en place et les éventuels risques qui pourraient peser sur les utilisateurs.

3.2 Comment ?

Le renforcement des mécanismes de partage du spectre peut améliorer la disponibilité effective de fréquences. Pour y parvenir, une mobilisation concertée des pouvoirs publics, des opérateurs, des équipementiers et des usagers est nécessaire.

Au-delà, les actions utiles sont listées dans le tableau ci-dessous :

Volets	Actions ?
Juridique	Lever les flous juridiques éventuels
	Identifier des modifications de la réglementation permettant d'améliorer les conditions de développement de ce type de mécanisme
Identifier les bandes de fréquences d'intérêt	Identifier toutes les bandes d'intérêt pour un renforcement des mécanismes de partage, notamment celles peu utilisées
	Valider les besoins et l'intérêt d'utilisateurs pour ces bandes
	Vérifier la présence/possibilité d'un écosystème
Favoriser l'émergence d'écosystèmes	Rassurer les acteurs sur le fonctionnement du système : revoir le système de pénalité en cas de non-respect des conditions techniques et renforcer l'effectivité des contrôles
	Consulter toutes les parties prenantes (entreprises et administrations) pour la définition du ou des modèles
	Opter pour des solutions standardisées (à l'échelle européenne à minima) ?
	Renforcer les expérimentations autour de la mise au point de solutions de partage innovantes
Résoudre les questions qui se posent autour de la gestion des bases de données	Qui s'en occupe (le régulateur, un/des tiers ou autres ?) A quel coût ?
	Quid de la sensibilité des données ?
	Certification des équipements/ vérification de la conformité au modèle
Identifier les besoins minimaux des acteurs	Quel doit être le niveau de dynamisme ?
	Les acteurs, non satisfaits des bandes libres, ont-ils besoin d'une quantité de spectre minimale garantie ?

Afin de permettre aux acteurs de s'exprimer sur ces questions, une consultation publique sera organisée par l'Arcep dans les prochains mois.

L'objectif est en premier lieu de partager l'analyse et le diagnostic sur les enjeux et solutions possibles de partage du spectre.

Il s'agira par ailleurs d'identifier les bandes de fréquences qui pourraient opportunément, ou non, voire de nouveaux modes de partage être introduits. Les acteurs seront également invités à s'exprimer sur les avantages et inconvénients des différentes solutions de partage possibles.

Réseaux du futur

Note n° 5 L’empreinte carbone du numérique

21 octobre 2019

1 Introduction

Les réseaux sont un des maillons essentiels de l’économie numérique et de l’accès à l’information. L’essor des communications électroniques fait reposer une importance croissante sur ces réseaux, tant d’un point de vue économique que social. L’impact croissant du numérique en termes d’émission de gaz à effet de serre (GES) est ainsi sujet d’attention¹. C’est à ce titre, dans le cadre de ses travaux à vocation prospective, que l’Arcep s’intéresse aux impacts environnementaux des réseaux et plus largement à ceux du numérique.

Les solutions numériques peuvent être généralement considérées comme un vecteur d’innovation permettant d’apporter des réponses concrètes aux défis environnementaux. En effet, en permettant une collecte de données et en développant des capacités d’analyse, le numérique favoriserait la quantification des impacts des différentes activités sur l’environnement². Le numérique contribue notamment à l’adaptation intelligente de la thermique des bâtiments, la détection et la mesure des pertes sur les réseaux d’électricité, de gaz ou d’eau ou encore la mutualisation des lieux de vie et de leurs fonctions³.

Toutefois, au-delà du potentiel de réduction des émissions de GES d’autres secteurs via les solutions numériques, peut se poser la question des émissions de GES du secteur numérique lui-même (c’est-à-dire des infrastructures et réseaux au sens large et des terminaux). Ce second sujet semble moins connu ; aussi cette note se concentre-t-elle plus spécifiquement sur les émissions de GES⁴ du numérique⁵ en considérant les émissions directes et indirectes⁶. Elle aborde dans une première partie les incitations qui peuvent amener les acteurs du numérique à limiter leurs émissions de GES et revient, dans une seconde partie, sur celles pour lesquelles il n’existe à ce jour que peu d’incitation à la réduction.

¹ <https://usbeketrica.com/article/paula-forteza-numerique-vert-smartphones-mails-datacenters>

² Cf. Rapport *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age* [1]

³ Cf. *Softplace, Scénarios extrêmes*, 2015. <http://reseau.fing.org/file/download/165306>

⁴ Cette note restreint volontairement son périmètre à l’émission de GES. Néanmoins, comme il a pu l’être indiqué au cours des auditions, ces émissions ne sont pas les seuls enjeux liés à l’empreinte écologique du numérique. D’autres enjeux pourraient être mentionnés tels que l’épuisement de ressources abiotiques, l’éco-toxicité, etc.

⁵ En effet, parmi ses attributions, l’Arcep doit prendre « des mesures raisonnables et proportionnées » en vue d’atteindre « un niveau élevé de protection de l’environnement » conformément à l’Article L32-1 du Code des postes et des communications électroniques.

⁶ C’est-à-dire les émissions de GES produites directement par le numérique ainsi que provenant de la production de l’électricité, de la chaleur ou de la vapeur importée et consommée par le numérique [2].

Ces travaux comprenant une dimension prospective, les effets potentiels des technologies et usages émergents seront également évoqués au fil de cette note.

2 Des enjeux énergétiques partiellement pris en compte par des acteurs du numérique

Malgré la faible intensité carbone de l'électricité disponible en France⁷, les émissions de gaz à effet de serre des opérateurs de télécom en France sont en majorité dues à la consommation électrique de leurs seuls réseaux (voir notamment référence [4]).

Les opérateurs télécoms peuvent être incités à améliorer l'efficacité énergétique des réseaux et des centres de données pour limiter leur facture énergétique. En effet, une estimation grossière situe la facture énergétique des opérateurs français de quelques dizaines à plusieurs centaines de millions d'euros⁸ en fonction de leur taille et du prix d'achat de l'électricité. Par exemple, pour les opérateurs mobiles, la consommation énergétique représenterait de l'ordre de 15 à 20 % des coûts d'exploitation⁹. Dans cette section sont ainsi présentés les impacts environnementaux (en matière d'émission de GES) du numérique que l'objectif de réduction de coûts d'exploitation peut conduire à rationaliser.

2.1 Des opérateurs de réseaux incités à l'efficacité énergétique

L'augmentation importante des usages numériques de ces dernières années devrait se poursuivre¹⁰. Or, **la consommation électrique des réseaux est, selon la technologie employée, variablement dépendante de leur utilisation**. Il ressort des auditions menées par l'Arcep que dans le cas particulier des réseaux mobiles, la consommation électrique d'une antenne en pic de trafic peut être jusqu'à trois fois supérieure à sa consommation au repos. Les équipements situés dans le cœur de réseau des opérateurs voient aussi leur consommation énergétique croître avec le trafic¹¹.

Dans ce contexte, afin de limiter les coûts d'exploitation de leur réseau dont la composante énergétique occupe une part importante, les **opérateurs sont incités à améliorer leur efficacité énergétique**, c'est-à-dire la consommation d'énergie nécessaire à la réalisation d'un usage donné.

2.2 Une différenciation concurrentielle des équipementiers intégrant la dimension d'efficacité énergétique

Les opérateurs, souhaitant améliorer l'efficacité énergétique de leurs réseaux ne serait-ce que pour réduire leurs coûts d'exploitation, répercutent cette contrainte sur les équipementiers. Ces derniers ont intégré cette exigence et cherchent à se démarquer en offrant des équipements optimisés. En particulier, ils intègrent des fonctionnalités visant à accroître l'efficacité énergétique des

⁷ L'intensité carbone (ou facteur d'émission) de l'électricité est la quantité de gaz à effet de serre consécutive à la production d'un kilowattheure d'électricité. En France, elle a été en 2018 de 57 g/kWh en moyenne contre 420 en UE. Source : [3]

⁸ Estimation faite sur la base des bilans RSE des opérateurs et du coût de l'accès régulé à l'électricité.

⁹ <https://www.mobileworldlive.com/ict-ee-18-news/global-ict-energy-efficiency-summit-paves-way-for-5g/>

¹⁰ A titre illustratif, Cisco évoque un taux de croissance annuel moyen du trafic vidéo de 33 % par an entre 2017 et 2022 passant d'un peu plus de 50 exaoctets par mois en 2017 à près de 300 exaoctets par mois prévus en 2022. La vidéo, qui représentait 55 % du trafic internet en 2017, devrait représenter 75 % du trafic d'ici à 2022. Cf : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>

¹¹ Voir par exemple les articles [5] et [6].

équipements qu'ils proposent : ces équipements peuvent désormais entrer en veille (en l'absence de sollicitation, notamment la nuit) ou désactiver certaines fonctionnalités en dehors des pics de demande (comme le MIMO¹²). Équipementiers et opérateurs contribuent également à des travaux visant à normaliser des mesures d'efficacité énergétique au sein d'organismes de standardisation internationaux. **Grâce à ces optimisations, il est attendu que les stations de base plus récentes offrent, à usages constants, des performances énergétiques par Mo transité sur le réseau meilleures que celles des précédentes générations.**

Pour autant, **les éventuels effets positifs de ces évolutions technologiques sont susceptibles d'être compensés par l'accroissement de la consommation** induite par celle des usages nouvellement permis : on parle ainsi d' « **effet rebond** » (cf. section 3.2 pour plus de détails).

2.3 Des technologies progressivement plus efficaces énergétiquement

Une grande partie du coût énergétique des échanges réseaux est attribuée au réseau d'accès, c'est-à-dire au lien entre le cœur de réseau de l'opérateur et le domicile de l'utilisateur¹³. Diverses technologies sont employées pour créer ce lien final : le cuivre (pour ADSL et VDSL), le câble, la fibre optique ou le réseau cellulaire. Sans que cela ait nécessairement constitué un objectif ayant motivé les innovations réalisées dans les technologies de réseaux de télécommunication, ces évolutions ont contribué à accroître l'efficacité énergétique du réseau d'accès fixe.

Concernant les réseaux fixes, un acteur a indiqué que la **fibre consomme en moyenne**¹⁴ un peu plus de **0,5 Watt** par ligne, soit trois fois moins que l'**ADSL (1,8 W)** et quatre fois moins que le **RTC (2,1 W) sur le réseau d'accès**. Les consommations énergétiques de ces technologies filaires dépendant assez peu des usages qui en sont fait, ces évolutions se traduisent donc par des gains de consommation en valeur absolue.

La **consommation des réseaux cellulaires est quant à elle davantage dépendante des usages**, la consommation se mesure donc en kWh par Go de données transmises (en moyenne **0,6 kWh/Go**¹⁵ d'après un des acteurs auditionnés).

En moyenne sur une année, en se fondant sur ces estimations et des hypothèses de consommation de données mobiles, un utilisateur de réseau 4G consommerait de l'ordre de 50 kWh¹⁶ d'électricité, contre 19 kWh pour une ligne RTC, 16 kWh pour de l'ADSL et 5 kWh pour une ligne fibre optique.

Cette évolution conduit notamment à s'interroger à long terme sur le maintien en service de technologies plus anciennes, comme certains éléments du réseau cuivre ou certaines technologies mobiles anciennes, dès lors qu'elles fournissent l'accès aux mêmes services pour l'utilisateur final *via* une technologie moins efficace sur le plan énergétique.

¹² Le terme MIMO ("*Multiple-input and multiple-output*") désigne une technologie mobile pour les communications sans fil. Cette technique utilise plusieurs antennes d'émission et de réception pour augmenter le débit.

¹³ A titre indicatif, en 2017, 80% des consommations énergétiques du réseau de Free provenaient du réseau d'accès [7].

¹⁴ Il s'agit là de la puissance estimée à partir de la consommation énergétique à l'année. En effet, pour les technologies filaires, la puissance varie peu en fonction de l'usage.

¹⁵ Une étude estimait qu'en Finlande la consommation était de 0,46kWh/Go en 2016 [8].

¹⁶ En considérant une consommation moyenne mensuelle de 6,7 Go. Source : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/observatoire-des-marches-des-communications-electroniques-en-france/obs-marches-2018-prov.html>

2.4 Des vertus environnementales de la mutualisation et du partage d'éléments de réseau

Afin d'améliorer leur bilan économique ou par contrainte réglementaire, les opérateurs de réseaux mutualisent pour partie leurs infrastructures. Cette mutualisation a un impact certain lors du déploiement même de l'infrastructure en évitant la duplication inutile de plusieurs éléments de réseaux. Concernant la phase d'exploitation, l'impact énergétique est difficile à évaluer et n'est pas documenté à la connaissance de l'Arcep.

2.5 Des exploitants de centres de données également incités à l'efficacité énergétique

Comme les réseaux, les centres de données¹⁷ ont vu leur efficacité énergétique s'améliorer, **les exploitants de centres de données étant incités à réduire leurs coûts d'exploitation** ; cela se traduit par une réduction de leur indicateur d'efficacité énergétique (PUE pour *Power Usage Effectiveness*¹⁸). Les opérateurs de centres de données, qu'ils soient opérateurs de télécommunications ou fournisseur de services, cherchent notamment à réduire les coûts liés à la climatisation. Ainsi, des solutions de circulation de l'air extérieur (dite *free cooling*) permettent de réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation et donc de réduire le PUE. Elles pourraient être complétées par le développement d'équipements plus résilients à des températures élevées et nécessitant donc moins de refroidissement¹⁹.

En 2017, **la consommation électrique associée à l'exploitation de l'ensemble des centres de données dans le monde était légèrement supérieure à celle nécessaire au fonctionnement des réseaux [9]**. En outre, la localisation géographique de ces centres de données étant indépendante du lieu d'exploitation de ces données, il conviendrait de tenir compte des caractéristiques locales de l'électricité utilisée lorsque ces centres de données sont situés hors du territoire français, en particulier en matière d'intensité carbone.

Par ailleurs, une solution pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données est de réutiliser la chaleur dégagée par les serveurs pour chauffer des habitations ou d'autres équipements (piscines, etc.) situés à proximité des data-centers. Cette piste est explorée par différentes entreprises et pourrait permettre à terme d'obtenir un PUE très proche de 1 quand la chaleur peut être réutilisée pour d'autres usages.

A plus long terme, la frontière entre les centres de données et les réseaux de télécommunications est susceptible de s'estomper davantage dans les prochaines années. Ainsi le **Multi-Access Edge Cloud** (ou MEC) permet de **déplacer une partie des fonctionnalités des centres de données dans le réseau** des opérateurs pour qu'elles soient au plus près des utilisateurs (cela permet de limiter la latence²⁰) ; l'impact sur les émissions de GES d'un tel développement est encore incertain²¹. A l'inverse, le

¹⁷ Les centres de données sont des infrastructures composées d'un réseau d'ordinateurs et d'espaces de stockage qui permettent à des entreprises ou des particuliers d'entreposer ou de traiter leurs données.

¹⁸ Cet indicateur représente le rapport entre l'énergie totale consommée par un centre de données et l'énergie consommée par les seuls équipements informatiques qui le constituent. Plus ce rapport est élevé, plus la quantité d'énergie utilisée par le centre de données est mobilisée par des équipements annexes tels que ceux de climatisation, d'éclairage ou de sécurité. Un PUE de 1 signifie que toute l'énergie du centre de données est consommée par ses serveurs.

¹⁹ Néanmoins, le respect des normes de santé pour les personnes travaillant dans les centres de données limitera les possibles élévations de température que les équipements seront amenés à supporter ; les gains attendus de telles évolutions devront donc nécessairement être plafonnés.

²⁰ C'est-à-dire le délai entre opérations.

²¹ En effet, le déploiement de cette technologie pourrait avoir à la fois des effets positifs (e.g. réduction du transport de données) ainsi que des effets négatifs (e.g. des centres de données moins optimisés et dont le PUE serait supérieur).

développement de la **virtualisation**²², qui **déplace une partie du réseau dans les centres de données**, est susceptible de réduire le besoin de renouvellement des équipements de réseau physique. Une même machine pouvant être utilisée pour supporter plus de fonctions réseaux, **cette standardisation pourrait contribuer à une amélioration de la réparabilité et de la recyclabilité de ces équipements**.

2.6 Une amélioration de l'efficacité énergétique qui compense, à ce stade, l'effet de l'explosion de trafic

Les données disponibles semblent montrer une stabilisation des émissions de GES des opérateurs de télécommunications français sur l'ensemble de leur périmètre d'activité²³. **Les mesures mises en œuvre par les opérateurs pour limiter les dépenses énergétiques de leurs réseaux semblent ainsi avoir jusque-là compensé l'accroissement des usages**, évitant une augmentation des émissions de GES des réseaux **sans toutefois conduire à une décroissance de celle-ci**. Pour autant, l'amélioration de l'efficacité énergétique pourrait ne pas suffire à absorber la très forte croissance des usages attendue dans les prochaines années.

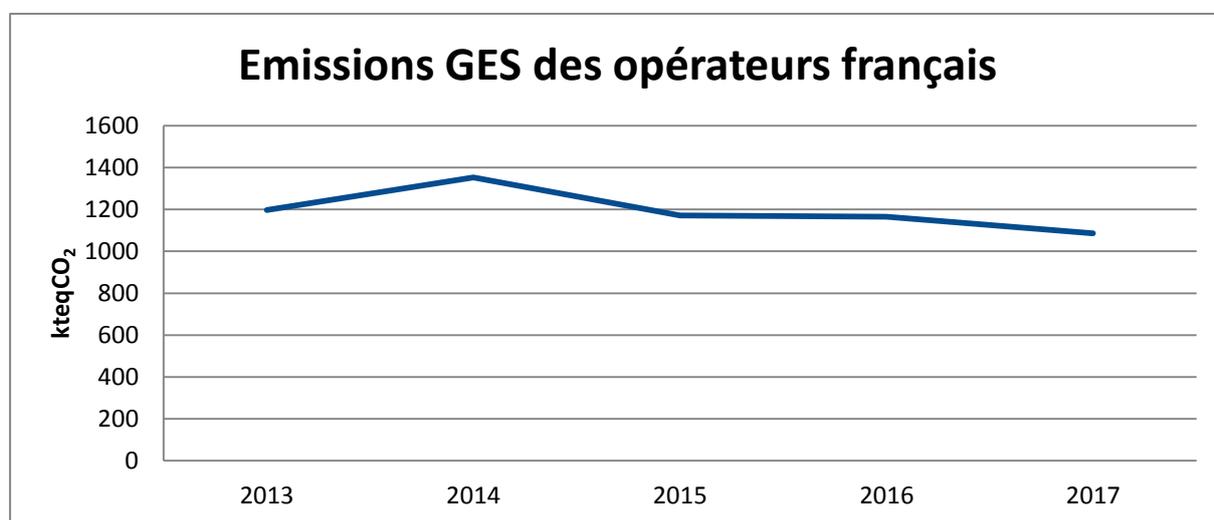


Figure 1 : Emissions carbone des opérateurs de télécommunications français. Source : réf. [4], [7] et [10] à [17], compilation des auteurs

Par ailleurs, bien que des analyses complémentaires soient nécessaires pour caractériser les émissions associées aux phases de production et de destruction ou recyclage des équipements de réseau, **les émissions de GES de ces infrastructures semblent assez largement imputables à leur consommation électrique pendant leur phase d'utilisation**. Cette répartition varie néanmoins d'un pays à l'autre en fonction des modes de production d'électricité.

²² C'est-à-dire la capacité de simuler le comportement matériel de certains équipements spécialisés par des logiciels fonctionnant sur des équipements informatiques génériques.

²³ Ces données sont à interpréter avec précaution du fait de l'évolution des périmètres d'activité de certains opérateurs sur la période considérée et de l'utilisation d'un facteur d'émission du kWh électrique plus faible, ce qui contribue à la baisse observée en 2017.

En effet, sur la phase d'exploitation, la consommation imputable aux réseaux représente environ un tiers de la consommation énergétique de l'ensemble du secteur numérique. Cette part diminue de moitié lorsque la production des équipements est incluse²⁴.

2.7 Des évolutions technologiques qui promeuvent de nouveaux usages

Avec l'explosion du trafic, les enjeux de consommation énergétique deviennent de plus en plus prégnants et sont désormais pris en compte lors de la définition de nouvelles normes. La 5G pourrait offrir, à usages constants, une meilleure efficacité énergétique que la 4G. Cependant, l'évolution des usages, qui va souvent de pair avec l'évolution technologique, pourrait remettre en question ces gains.

D'une part, elle pourrait engendrer une augmentation des émissions de GES des opérateurs puisqu'il a été estimé au cours d'une audition que **l'amélioration de l'efficacité énergétique ne suffira pas, à long terme, à contrebalancer l'augmentation du trafic**. Ainsi, par effet rebond (dont le mécanisme est développé en partie 3.2), une évolution technologique qui s'avère permettre une réduction des émissions de GES à usage constant est susceptible de produire en fait un accroissement global des émissions en raison de la multiplication des usages qu'elle permet.

D'autre part, les évolutions des réseaux sont souvent suivies **par des évolutions importantes des usages qui requièrent que les utilisateurs renouvellent leurs équipements pour en bénéficier**. Ainsi, les générations successives de réseaux mobiles ont encouragé un **renouvellement du parc des terminaux** ; les augmentations de débits ont aussi permis d'afficher des contenus en plus haute résolution sous réserve d'avoir la télévision permettant d'en bénéficier. Comme il sera vu en section 3.3, cet effet est susceptible d'avoir un effet important en termes d'émissions de GES.

Enfin, par souci d'économie, les opérateurs pourraient préférer déployer des accès très haut débit en recourant à des technologies sans fil plutôt qu'en déployant de la fibre, voire à les proposer en complément de l'ADSL. Cela est notamment justifié par l'augmentation des débits permis par la 4G et la 5G. Or ce type de technologie d'accès consomme plus d'énergie que la fibre, surtout lorsque les usages évoluent grâce à la montée en débit permise.

3 Certains effets du numérique sont trop diffus pour faire l'objet naturellement d'une optimisation énergétique

Comme indiqué plus haut, certains acteurs ont un intérêt significatif à maximiser l'efficacité énergétique de leurs équipements et processus afin de limiter les coûts d'exploitation associés (en particulier les opérateurs de réseaux et de centres de données, dont l'exploitation représente en environ un tiers de la consommation énergétique du secteur). Cependant, **il apparaît d'une part que ces acteurs n'ont pas nécessairement intérêt à limiter les consommations électriques lorsque celle-ci ne leur est pas facturée, et d'autre part que la fragmentation des acteurs (souvent les consommateurs finaux) concernés par ces consommations induit un impact au niveau individuel négligeable alors qu'il représente au niveau agrégé une part substantielle de la consommation énergétique du secteur**.

²⁴ D'après le rapport [9], l'énergie monopolisée par le numérique est principalement utilisée par les consommateurs (20%), la production et l'utilisation des *data-centers* (19%), la production et l'utilisation des réseaux (16%) et par la production (uniquement) des ordinateurs (17%), smartphones (11%) et télévisions (11%).

3.1 Des équipements terminaux dont le coût énergétique est principalement transféré aux consommateurs

Les constructeurs et opérateurs n'ont pas d'incitation économique directe à réduire la consommation électrique des équipements lorsque celle-ci est facturée à l'utilisateur. Or, bien que les box opérateurs, téléviseurs, consoles et autres équipements soient généralement allumés en continu, ce n'est que récemment que la consommation électrique de ces équipements (notamment les box) commence à être perçue comme un critère de choix par les utilisateurs et est ainsi susceptible de devenir un enjeu concurrentiel. Dans le cas des terminaux mobiles, les utilisateurs tiennent essentiellement compte de l'autonomie²⁵ dans leurs choix mais la tendance semble plus être à l'accroissement des capacités des batteries [9] plutôt qu'à la réduction de la consommation énergétique des smartphones²⁶.

Le saviez-vous ?

Utilisées quelques heures par jour en moyenne, les box internet allumées en permanence ont en Europe une consommation équivalente à la production de deux à trois réacteurs nucléaires. Cela peut s'expliquer par l'absence d'incitation suffisante, tant pour les utilisateurs finals que pour les opérateurs, à limiter la consommation de tels équipements et à les éteindre lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Par ailleurs, **contrairement aux réseaux, la phase d'utilisation des terminaux ne représente qu'une composante minoritaire de leurs émissions de GES**. En effet, les impacts associés à la production de ces équipements sont particulièrement élevés et il n'existe pas de filière de recyclage réellement développée à ce stade. Suite aux auditions menées par l'Arcep, sur une analyse de cycle de vie, il apparaît que la phase d'utilisation ne représenterait, au niveau mondial²⁷, qu'environ 20 %²⁸ de leur émissions de GES. Une telle répartition pourrait signifier que les fabricants de terminaux optimisent cette dépense énergétique, tout comme le font les opérateurs de télécommunications. Toutefois :

- Contrairement à d'autres produits de consommation courante, il est probable que le coût des terminaux ne soit pas piloté au premier ordre par celui des matières qui le constituent mais plutôt par les questions de recherche et développement technologiques ou de marketing. Or, les émissions de GES de ces terminaux sont principalement dues aux étapes de production (énergie mobilisée pour l'extraction de ces matières premières, consommation électrique nécessaire à l'assemblage...) qui se déroulent essentiellement dans des zones géographiques où l'électricité peut être très carbonée. Dès lors, pour un fabricant, les incitations à réduire les émissions de GES pourraient être marginales relativement au coût total du produit. Cependant, à la connaissance l'Arcep, il n'existe pas d'évaluation publique sur ce sujet
- Il convient de noter que les terminaux ont en moyenne une faible durée d'utilisation (de l'ordre d'une vingtaine de mois – cf. [20]). Cela peut expliquer la forte contribution de la phase de production des terminaux dans leurs émissions globales de GES.

²⁵ Voir par exemple https://www.frandroid.com/produits-android/smartphone/408620_lautonomie-et-les-performances-sont-les-principaux-criteres-dachat-de-nos-lecteurs

²⁶ Notamment car la consommation des écrans augmente avec leur résolution https://www.washingtonpost.com/technology/2018/11/01/its-not-your-imagination-phone-battery-life-is-getting-worse/?utm_term=.b0a58edce648

²⁷ Comme pour les équipements réseaux, cette répartition varie en fonction des modes de production d'électricité dans le pays où le terminal est utilisé.

²⁸ A titre indicatif, d'après Apple, l'utilisation du dernier iPhone ne représenterait que 17% de son empreinte énergétique totale [18] et une étude d'Ericsson aboutissait à un ordre de grandeur similaire pour les autres smartphones [19].

Faute de documentations plus détaillées sur le sujet à la connaissance de l'Arcep, il n'est cependant pas possible de définitivement trancher les motifs d'une telle répartition des GES entre phase de production et d'utilisation des terminaux.

Plusieurs solutions sont néanmoins envisagées pour réduire les émissions de GES imputables aux terminaux en dehors de leur utilisation : la réutilisation des terminaux et équipements permet d'allonger leur cycle de vie et peut s'inscrire dans une plus large démarche d'écoconception²⁹. Ainsi, dans un souci d'optimisation des coûts, certains opérateurs recyclent les boxes de leurs abonnés, ce qui contribue également à allonger leur durée de vie dans la mesure où elles peuvent servir à de nouveaux abonnés. Par ailleurs, certains constructeurs de terminaux réduisent les émissions de GES liées à la fabrication des équipements en recourant autant que possible à des énergies renouvelables et en les recyclant³⁰. Enfin, certains constructeurs mettent en avant la réparabilité et la modularité de leurs terminaux afin d'en réduire la fréquence de renouvellement³¹. En effet, le niveau de réparabilité varie significativement d'un terminal à un autre et certains terminaux sont en pratique jugés quasi-irréparables³².

3.2 Les centres de données et réseaux : une consommation énergétique moins contrôlée sur la phase de production, résiduelle par rapport à la phase d'exploitation

La phase d'exploitation des centres de données et des réseaux est relativement longue ; dès lors, la réduction de l'empreinte carbone liée à la fabrication et à la mise au rebut des équipements qui composent les centres de données et les infrastructures réseaux est moins sujette à des incitations financières significatives que pour l'empreinte résultant de leur utilisation. A la connaissance de l'Arcep, actuellement peu d'éléments sont toutefois disponibles concernant des éventuelles Analyses de Cycle de Vie des équipements qui composent les centres de données et les réseaux.

3.3 Une difficulté croissante à réduire, voire à stabiliser l'impact énergétique du numérique du fait de l'accroissement des usages

Le défi de l'effet rebond : l'exemple du cloud gaming

L'effet rebond désigne l'augmentation de consommation liée aux différentes innovations technologiques (*i.e.*, baisse des coûts, amélioration de l'efficacité énergétique, etc.). Il est pour la première fois mis en évidence par W. Stanley Jevons (« paradoxe de Jevons », [21]) puis actualisé par les économistes Daniel Khazzoom et Leonard Brookes (« postulat de Khazzoom-Brookes », [22]). Il représente un « paradoxe » dans la mesure où toute évolution d'un usage ou d'une technologie qui s'avère améliorer l'efficacité énergétique d'une activité devrait impliquer, *a priori*, une réduction de l'impact énergétique total de cette activité. Cependant, si cette amélioration engendre (ou se produit) en parallèle (d') une baisse du coût de production du service considéré, cette baisse de coût permet alors de produire une plus grande quantité du bien ou service pour un prix inférieur et a pour effet d'en stimuler la demande. Jevons estime ainsi que « l'idée selon laquelle un usage plus

²⁹ Voir par exemple <https://bienvivredigital.orange.fr/etiquettes/reflexes-verts-ainsi-que-les-smartphones-recertifiés> tels que <https://e.foundation/e-pre-installed-smartphones/>

³⁰ <https://www.apple.com/environment/our-approach/>

³¹ Voir par exemple <https://shop.fairphone.com/en/> et <https://www.shiftphones.com/en/>

³² <https://fr.ifixit.com/smartphone-repairability>

économique du combustible équivaldrait à une moindre consommation est une confusion totale. C'est l'exact contraire qui est vrai. »³³

Les services de cloud gaming illustrent cette idée. En effet, **le cloud gaming permet une mutualisation des ressources informatiques dédiées aux jeux vidéo et allonge donc la durée de vie des terminaux** (consoles et ordinateur), en réduisant ainsi le coût de fabrication et de recyclage. Le cloud gaming, à niveau d'usage constant, **permettrait de réduire l'empreinte énergétique** des activités vidéo-ludiques grâce à une réduction du nombre de terminaux produits.

Néanmoins, pour évaluer l'effet total sur la consommation énergétique, **il est nécessaire de prendre en compte plus largement tous les effets de ce type de service**. Par exemple des entreprises comme Blade (Shadow), Google (Stadia) et Microsoft (xCloud) proposent des offres de jeux dans le cloud promettant des performances similaires à celles obtenues sur des consoles et ordinateurs haut de gamme à moindre coût³⁴, rendant ainsi le service abordable auprès d'un plus grand nombre d'utilisateurs, et leur permettant une utilisation plus intensive avec un accès abordable à un plus grand nombre de jeux. En particulier, les modèles économiques qui s'appuient principalement sur la publicité et l'exploitation de données peuvent proposer des services présentés comme « gratuits » et pourraient entraîner une stimulation plus importante du niveau de la demande. Dans ce contexte, **le passage au cloud gaming pourrait conduire à une augmentation d'usage susceptible de contrebalancer les éventuels gains énergétiques** qu'il aurait permis d'exploiter³⁵.

Pour comprendre l'effet d'une amélioration de l'efficacité énergétique, et plus largement d'une innovation dans le cadre de l'économie numérique, **il est nécessaire d'adopter une approche globale prenant à la fois en compte les conséquences de cette innovation sur les terminaux, les réseaux, les centres de données et sur l'ensemble des usages associés**³⁶ et qui se développent.

Tendances à l'accroissement potentiel des émissions de GES lié à la multiplication des usages

Les assistants intelligents embarqués dans les smartphones et enceintes vocales permettent des interactions simplifiées, voire automatisées, avec les équipements domotiques (machine à café, télévision, réfrigérateur, lampes). Interagir avec une lampe en passant par un assistant intelligent engendrera plusieurs connexions avec les serveurs distants du fabricant de la lampe³⁷ et de l'assistant³⁸. **En conséquence, si l'automatisation de la gestion de certains équipements** (par exemple le chauffage) **peut réduire la consommation énergétique d'un foyer, l'utilisation des assistants vocaux pour piloter des équipements pourrait entraîner à l'inverse des inefficacités**.

³³ "It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth."

³⁴ Via les synergies que ces entreprises peuvent exploiter et grâce aux business model de plusieurs d'entre elles (plateformes bifaces, écosystème fermés, etc).

³⁵ «Google's Stadia is the future of gaming, and that's bad news for Earth»: <https://www.digitaltrends.com/gaming/google-stadia-is-the-future-of-gaming-and-thats-bad-news-for-earth/>
<https://www.digitaltrends.com/gaming/google-stadia-is-the-future-of-gaming-and-thats-bad-news-for-earth/>

³⁶ Plusieurs travaux académiques s'intéressent aux sens causals de la croissance de la demande dans le contexte de l'économie numérique (Voir notamment [23] et [24]).

³⁷ Voir p.17,[25] concernant la consommation d'une lampe. Plus largement sur la smart home : <https://gizmodo.com/the-house-that-spied-on-me-1822429852>

³⁸ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-02-12/your-smart-light-can-tell-amazon-and-google-when-you-go-to-bed>

3.4 Les bonnes pratiques à promouvoir pour minimiser les impacts du numérique

Les enjeux de l'éco-conception des services numériques

Avec le développement des terminaux et des réseaux, les développeurs d'applications et services sont moins contraints que dans un passé récent dans leur utilisation des ressources (bande passante, puissance de calcul, stockage). Ils peuvent donc être **moins vigilants que par le passé sur l'utilisation de ces ressources et enrichissent les applications de fonctionnalités potentiellement accessoires** (on parle de création « d'obésiciels »). Ces applications qui consomment plus de ressources posent plusieurs problèmes:

- Elles augmentent le trafic de données résultant de leur utilisation et induisent une plus forte consommation des réseaux
- Elles augmentent l'utilisation des ressources (notamment des processeurs) et donc la consommation des équipements terminaux.
- Elles peuvent causer des ralentissements sur les terminaux plus anciens, moins performants, et donc inciter leurs utilisateurs à s'en séparer. Ce phénomène peut ainsi accélérer le renouvellement des terminaux.

Ces services et applications pourraient être proposés dans une version allégée de certaines fonctionnalités et moins gourmande en ressources. Ainsi, dans les pays où les smartphones disposent de moins de mémoire³⁹ (notamment dans certaines zones d'Asie du Sud-Est), Google propose des déclinaisons épurées de ses services sous l'appellation « Go »⁴⁰. Maps Go, Youtube Go et les autres services de la gamme offrent les mêmes fonctionnalités principales que les applications smartphones dites *natives* tout en étant plus légères. Certaines de ces applications sont en fait des Progressive Web Apps (PWAs) : des applications s'exécutant dans un navigateur.

Ce type de démarche s'inscrit dans l'approche de **l'éco-conception des services numériques** qui a pour objectif d'offrir à l'utilisateur final un **service de qualité sensiblement équivalente en mobilisant significativement moins de ressources**. Les bonnes pratiques qui s'inscrivent dans cette démarche sont par exemple valorisées par le « collectif conception numérique responsable »⁴¹ qui a pu mettre en évidence que des résultats importants pouvaient être obtenus en matière de réduction des ressources à mobiliser pour un service rendu⁴².

³⁹ Ou lorsque les forfaits d'accès à internet sont plus contraints ou que la qualité du réseau est moins bonne.

⁴⁰ <https://www.android.com/versions/go-edition/>

⁴¹ <http://collectif.greenit.fr>

⁴² <http://www.innovergne.fr/sites/www.innovergne.fr/files/webmaster/transfert/Fichiers-JTT/2017-03-innovergne-conf-eco-all-in-on-v1.1-part2.pdf>

Enfin, dans ce contexte de valorisation de démarches de conception numérique vertueuse, certains interlocuteurs déplorent le cloisonnement académique qui peut exister dans les formations, notamment les écoles d'ingénieurs, entre les disciplines associées au domaine environnemental et celles associées aux technologies de l'information et de la communication, les secondes pouvant nécessiter une sensibilisation aux premières. Cette interdisciplinarité nécessaire commence doucement à se développer : certaines formations courtes, par exemple au sein de l'Université de La Rochelle⁴³, introduisent aux fondamentaux du numérique dits responsables.

Utiliser les atouts de la régulation par la donnée

Certains acteurs économiques ont des incitations (la limitation de leurs coûts d'exploitation en premier lieu) à maximiser l'efficacité énergétique de leurs processus. Pour autant, compte tenu de la croissance des usages, de telles pratiques pourraient ne pas être suffisantes pour réduire durablement l'empreinte énergétique du numérique. Il pourrait ainsi être pertinent d'engager une démarche, fondée sur les principes de régulation par la donnée, qui viserait :

1. **à rendre l'information en matière d'impacts associés aux usages du numérique disponible et compréhensible par le public, ce qui implique la mise en place d'un référentiel métrologique partagé.** Dans ce contexte, un meilleur accès à des informations ouvertes et aisément réutilisables concernant les émissions de GES des acteurs du numérique, sur l'ensemble de leur périmètre d'activité et de manière standardisée (par exemple l'ensemble des scopes 1, 2 et 3 du GHG Protocol – cf. [23]) permettrait de faciliter l'expertise et de favoriser le dialogue sur des bases communes⁴⁴ ;
2. **à favoriser l'émergence de services appréhendables par le grand public, par exemple en utilisant les données ouvertes** ainsi créées, sur le modèle de l'écosystème applicatif utilisant la base Open Food Fact⁴⁵. **Les informations de consommations énergétiques et d'impacts environnementaux ainsi que la réparabilité⁴⁶** pourraient être ainsi facilement **accessibles au consommateur au final** au moment opportun. Un tel indice de réparabilité est proposé dans le cadre du projet de loi relatif à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire⁴⁷ ;
3. **à favoriser les approches de types nudges** ([27] et [28]) et les apports des sciences humaines sur les déterminants de la motivation des utilisateurs dans leurs choix de consommation. Par exemple, les applications de streaming pourraient indiquer la consommation évitée en téléchargeant le contenu en WiFi plutôt que via un réseau mobile ; l'interface de gestion des box internet fixe pourrait également, par la mise en place d'API idoines, contribuer à informer l'utilisateur final⁴⁸ des conséquences de ses actes de consommation numérique ;
4. **à évaluer les effets de telles pratiques.**

4 Éléments de conclusion

Le numérique est devenu un maillon essentiel de l'économie et est un vecteur d'innovations disposant d'un potentiel de décarbonation de plusieurs secteurs d'activité⁴⁹. Malgré ce potentiel

⁴³ <https://www.greenit.fr/formations/>

⁴⁴ A noter dans cet esprit le « Digital Environmental Repository » du Shift Projet, voir p.27[9]

⁴⁵ A titre d'exemple, l'application Yuka, qui permet d'obtenir des informations sur un aliment en scannant le code-barres du produit, utilise la base Open Food Facts <https://world.openfoodfacts.org/>

⁴⁶ Voir par exemple le score de réparabilité de iFixit : <https://www.ifixit.com/smartphone-repairability>

⁴⁷ Voir la version adoptée en première lecture par le Sénat : <https://www.senat.fr/leg/tas18-148.html>

⁴⁸ Il serait toutefois nécessaire de faire une évaluation coût/bénéfice pour s'assurer que le recours à de tels outils générerait bien une réduction nette de la consommation énergétique

⁴⁹ <https://www.theverge.com/2019/6/25/18744034/ai-artificial-intelligence-ml-climate-change-fight-tackle>

pour les autres secteurs, qu'il conviendrait de valoriser et soutenir, il est constaté que le numérique reste émetteur net⁵⁰ de GES. Ce secteur représente **aujourd'hui environ 3 % des émissions mondiales de GES**⁵¹. Afin de limiter leurs coûts d'exploitations, certains acteurs du numérique ont su optimiser, pour partie, la consommation énergétique d'équipements et services. Cependant, une telle démarche n'a pu, seule, enrayer la **croissance de ces émissions qui, selon certaines sources [9], pourrait atteindre 8% par an**⁵², compte tenu de l'accroissement des usages tant internes au numérique que ceux proposés au service d'autres secteurs. Ces deux aspects amènent à considérer qu'au-delà de l'enjeu d'efficacité, voire pour y contribuer, **une certaine forme de sobriété pourrait constituer une réponse aux nouveaux enjeux** auxquels doit faire face le numérique.

En sus de la recherche d'efficacité énergétique spontanée de la part des acteurs industriels du numérique et motivée par des questions principalement économiques, **la question du maintien de certaines technologies, de moins en moins utilisées, se pose** : en effet, elles engendrent des consommations énergétiques potentiellement significatives en contrepartie d'un bénéfice faible du fait du déploiement de réseaux de nouvelle génération.

De plus, le **développement de formations et de bonnes pratiques** tendant à favoriser la **création d'équipements et de services numériques « éco-conçus »** représente également un axe à mobiliser.

Enfin, **informer les citoyens** sur les effets de leur consommation numérique dans l'esprit de la régulation par la donnée prônée par l'Arcep permettrait à chacun d'adopter des démarches d'éco-consommation et contribuer à maximiser des usages vertueux du numérique ; la puissance publique pourrait contribuer à ces leviers importants.

⁵⁰ C'est-à-dire en comparant les émissions propres du secteur et les émissions évitées dans d'autres secteurs par le numérique – cf. [29].

⁵¹ Les estimations de la part du numérique dans les émissions de GES varient de 2% à 3,9% selon les études et le périmètre considéré. L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) estime que le numérique représente de 2% à 2,5%[30] des émissions de GES alors que le ShiftProject[9] et GreenIT[31] situent respectivement cette part 3,7% et 3,9%.

⁵² Une autre étude estime toutefois que cette croissance est significativement plus faible sur la période 2010-2015 [32]

5 Références

- [1] Rapport *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*, The Climate Group and Global e-Sustainability Initiative, 2008.
- [2] ADEME, *Lignes directrices pour le développement d'un guide sectoriel bilan d'émission de gaz à effet de serre*, <http://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/ADEME%20lignes%20directrices%20guides%20sectoriels%20bilans%20GES.pdf>
- [3] *Bilan GES*, ADEME, <http://www.bilans-ges.ademe.fr>
- [4] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2016.
- [5] Hinton, Kerry & Baliga, Jayant & Feng, Michael & Ayre, R.W.A. & Tucker, Rodney. (2011). *Power Consumption and Energy Efficiency in the Internet. Network, IEEE*. 25. 6 - 12. 10.1109/MNET.2011.5730522.
- [6] Alharbi, Hatem & Musa, Mohamed & El-Gorashi, Taisir & Elmighani, Jaafar. (2018). *Real-time Emissions of Telecom Core Networks*
- [7] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2017
- [8] *Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking*, Hanna Pihkola, Mikko Hongisto, Olli Apilo and Mika Lasanen, 2018
- [9] *Lean ICT – Pour une sobriété numérique*, The Shift Project, Octobre 2018.
- [10] Base de données environnementales d'Orange, années 2013 à 2017. <https://www.orange.com/fr/Human-Inside/Reporting/Folder/base-de-donnees-RSE>
- [11] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2014.
- [12] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2015.
- [13] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2016.
- [14] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2017.
- [15] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2013.
- [16] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2014.
- [17] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2015.
- [18] *iPhone Xs Max Environmental Report*, https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_XS_Max_PER_sept2018.pdf

- [19] *Life Cycle Assessment of a Smartphone, Mine Ercan, Jens Malmodin, Pernilla Bergmark, Emma Kimfalk and Ellinor Nilsson*
<https://www.ericsson.com/assets/local/publications/conference-papers/life-cycle-assessment-of-a-smartphone.pdf>
- [20] <https://fr.kantar.com/tech/mobiles/2017/smartphones-une-croissance-au-point-mort/>
- [21] *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, W. Stanley Jevons, 1865.
- [22] *The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth*. The Energy Journal. 13 (4): 131–148, Saunders, Harry D., 1992.
- [23] *The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic*, Cho et al, 2006.
- [24] *Understanding the demand growth for digital connectivity*, Van der Vorst & Brennenraedts, 2018.
- [25] *La face cachée du numérique*, ADEME, Novembre 2018.
- [26] *A Corporate Accounting and Reporting Standard – Revised edition*, The Greenhouse Gas Protocol, 2004.
- [27] *Les nudges dans la régulation environnementale : alternative ou complément aux instruments monétaires ?*, thèse doctorale de Benjamin Ouvrard, 2016.
- [28] *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*, Thaler et Sunstein, 2009
- [29] *ICT Sector Helping to Tackle Climate Change, Nations Unies sur le changement climatique*, Août 2016. Voir: <https://unfccc.int/news/ict-sector-helping-to-tackle-climate-change>
- [30] *ICTS and Energy Efficiency*,
https://www.itu.int/en/action/climate/Pages/energy_efficiency.aspx
- [31] *Etude "Empreinte environnementale du numérique mondial"*, GreenIT.fr, Octobre 2019
- [32] *The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015*, [Malmodin](#) et [Lundén](#)

6 Annexe : personnes auditionnées

- Jean-Marc Jancovici, Carbone 4, membre du Haut conseil pour le climat.
- Liliane Dedryver, France Stratégie.
- Hugues Ferreboeuf, The Shift Project.
- Raphaël Guastavi, Erwan Autret, Alain Anglade, ADEME.
- Frédéric Bordage, GreenIT.
- Philippe Tuzzolino, Jean-Manuel Canet, Hervé Mallet, Orange.
- Christophe Grangeat, Joel Leclair, Denis Blavette, Gilbert Buty, Nokia.
- Jacques-François Marchandise, Fondation Internet Nouvelle Génération.

Réseaux du futur

Note n° 6

L'intelligence Artificielle dans les réseaux de télécommunications

14 janvier 2020

1 Introduction

Dans sa définition large, le domaine de « l'intelligence artificielle » (IA) peut être distingué en deux grandes classes avec d'un côté l'IA symbolique et de l'autre l'IA connexionniste (*machine learning*, *deep learning*). C'est à ce dernier domaine que se limite la présente note puisque ce sont les techniques issues de ce champ de recherche qui semblent les plus à même de transformer les réseaux de télécommunications dans les prochaines années.

1.1 Que peut apporter l'IA dans les réseaux de télécommunications ?

Les algorithmes d'apprentissage automatique, et en particulier les algorithmes d'apprentissage profond (*deep learning*), sont d'une manière générale particulièrement efficaces pour représenter et analyser des situations complexes lorsqu'une quantité d'informations importante est disponible.

Les réseaux de télécommunications sont des objets complexes comprenant de nombreux composants avec de nombreux paramètres sur lesquels il est possible d'agir, ce qui rend leur modélisation en vue de leur optimisation complexe. Les réseaux de télécommunications génèrent également une quantité très importante de données sur leur fonctionnement (notamment les données télémétrie, indicateurs de qualité de service, taux de disponibilité...) permettant à leurs exploitants d'avoir une image précise de leurs performances. Cette complexité et cette abondance de données ont naturellement conduit les opérateurs et les équipementiers à s'intéresser aux techniques d'apprentissage automatique pour optimiser le fonctionnement des réseaux.

1.2 Quelques éléments sur l'apprentissage

Les algorithmes d'apprentissage reposent sur des modèles qui peuvent être de nature différente. Chaque algorithme d'apprentissage a ses propres spécificités et est plus ou moins efficace selon la nature des tâches qu'il doit accomplir. Récemment, le *deep learning*, qui repose sur un modèle de réseaux de neurones, a permis de nombreuses avancées dans le domaine de l'apprentissage automatique. Cette évolution est une des causes principales des progrès attribués à l'IA ces dernières années.

Au-delà des types de modèles utilisés, il existe divers modes d'apprentissage en fonction des données dont on dispose pour entraîner l'intelligence artificielle et de la réponse souhaitée ainsi que des usages envisagés, notamment :

- l'apprentissage supervisé : ce type d'apprentissage construit un modèle à partir d'un jeu de données que l'on a déjà qualifiées (ou labellisées). Par exemple, on va fournir en entrée une

base d'images de chiffres manuscrits en indiquant pour chacune d'elle à quel chiffre elle correspond, et à partir de ce jeu de données l'algorithme va construire un modèle permettant de labelliser n'importe quels nouveaux chiffres manuscrits.

- l'apprentissage non-supervisé : ce type d'apprentissage construit un modèle à partir d'un jeu de données qui n'a pas été labélisé préalablement. Par exemple, à partir d'images de visages de différentes personnes, l'algorithme construira un modèle permettant de classer les visages dans différents groupes selon des critères qu'il aura lui-même établi.
- l'apprentissage par renforcement : ce type d'apprentissage permet au modèle d'apprendre en réalisant des actions sur son environnement et en obtenant en retour une information sur la conséquence de ces actions. En pratique, à chaque action effectuée est attribué un score que le modèle cherche à maximiser. Par exemple, un algorithme pourra, en itérant de nombreuses parties contre lui-même ou d'autres joueurs, affiner son niveau à chaque partie d'un jeu (utilisé pour le jeu de go par exemple).

2 Place de l'IA dans les réseaux

Dans un contexte où les réseaux tendent à se complexifier (croissance du nombre de services, besoin d'interopérabilité, développement de la virtualisation, etc.) les opérateurs s'interrogent sur un éventuel recours à l'Intelligence Artificielle en support, voire le cas échéant en remplacement, des opérateurs humains dans la gestion et l'optimisation des services. L'IA est aussi utilisée dans des cas moins évidents de prime abord, par exemple dans le domaine de la planification radio où elle permet de compléter la théorie du signal pour améliorer les communications sans fils.

Il est à noter que les solutions IA restent très dépendantes des opérateurs humains : apprentissage en continu, alimentation par des données fiables. Ainsi, si des opérateurs humains n'utilisent plus ou n'alimentent plus une solution IA, cette dernière peut rapidement devenir obsolète.

2.1 Optimisation des services

L'intelligence artificielle permet d'apprendre d'expériences passées qui ont été observées. Dans le cas des réseaux, ces expériences passées peuvent concerner les pannes ou les dysfonctionnements observés et les solutions employées pour les résoudre. La collecte d'information de télémétrie en continue ainsi que la concentration de cette information requise pour le SDN¹ permet à l'intelligence artificielle d'apprendre à partir de large volumes de données. Au-delà de la volumétrie de données, le processus décisionnel au niveau du SDN pourrait gagner en efficacité grâce à la capacité de ces réseaux virtualisés à gérer des données protéiformes et de diverses origines.

2.1.1 La maintenance prédictive

Certaines défaillances informatiques (par exemple dysfonctionnement de VPN, indisponibilité de ressources, etc.) peuvent déjà être identifiées, voire anticipées, en utilisant des règles prédéfinies. Mais plus ces règles sont nombreuses, plus leur mise à jour est complexe. Par ailleurs, il est

¹ Le « Software Defined Network » permet un pilotage centralisé des équipements, mais requiert pour cela une vue globale du réseau. Voir la note « Virtualisation des réseaux » : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-virtualisation-des-reseaux-juillet2019.pdf

nécessaire de trouver un équilibre entre des règles trop strictes qui vont faire remonter un grand nombre d'alertes (faux positifs) et des règles trop laxistes qui ne vont pas identifier des problèmes pourtant critiques (faux négatifs).

Un équipementier indique ainsi utiliser l'IA pour améliorer significativement la maintenance prédictive.

En effet, d'une part, en s'appuyant sur des jeux de données décrivant les dysfonctionnements antérieurs et en connaissant l'expérience utilisateur, l'apprentissage supervisé peut identifier un état de dysfonctionnement en prenant en considération l'ensemble des paramètres permettant de le caractériser.

D'autre part, compte-tenu du volume et de la variété des données qui doivent être analysées, l'apprentissage automatique peut apporter une aide à l'opérateur humain en identifiant les signaux faibles préfigurant une panne. En entraînant un modèle de prédiction à partir des cas de pannes précédentes, il sera *a minima* possible de reconnaître les patterns correspondants aux premiers symptômes d'un dysfonctionnement et ainsi de mieux les anticiper mais permettra également de détecter de nouveaux types de dysfonctionnement.

2.1.2 La réponse aux incidents

Une fois un incident détecté ou anticipé, l'intelligence artificielle peut rapidement considérer l'ensemble des solutions envisageables, simuler leur déploiement et en mesurer les potentiels effets afin de les proposer à un opérateur humain qui pourra alors faire un choix parmi les solutions proposées. Dans le cas de décisions qui ne sont pas critiques ou dont les effets sont limités, l'intelligence artificielle pourrait potentiellement d'elle-même choisir la solution à adopter évitant ainsi de solliciter un opérateur humain et, si le réseau est orchestré, procéder à son déploiement. L'IA symbolique pourrait également intervenir ici mais ce sujet dépasse le champ de cette note.

2.1.3 L'optimisation des équipements et du réseau en temps réel

Comme lorsqu'elle cherche à répondre à des incidents, l'intelligence artificielle peut considérer l'ensemble des modifications qu'elle peut apporter à la configuration du réseau et simuler le déploiement de ces modifications afin d'en évaluer les effets. L'intelligence artificielle peut notamment servir à optimiser la consommation énergétique des réseaux en mettant en veille les équipements (antennes, serveurs, fibres...) ayant peu de chance d'être utilisés ou au contraire en leur allouant dynamiquement plus de ressources². L'apprentissage automatique peut aussi être associé au Software Defined Network (SDN) afin de configurer le réseau de manière globale et cohérente (placement des fonctions dans le réseau, estimation des ressources à allouer, etc.).

2.1.4 La classification du trafic

Les politiques de routage ou d'ingénierie de trafic reposant sur l'exploitation des caractéristiques du trafic sont courantes. Cependant, les opérateurs ne peuvent s'appuyer sur les informations contenues dans les paquets (qu'il s'agisse des numéros de port ou des informations encapsulées comme les URL) pour identifier avec une granularité plus fine les différents types de flux. Certains

² A l'inverse, l'entraînement des modèles d'IA peut être fortement consommateur en ressources en raison de la quantité de données et de la puissance de calcul nécessaires.

cherchent ainsi à recourir à l'apprentissage automatique pour classer le trafic³. Néanmoins, si cette classification servait à prioriser certains types de flux mais que l'IA était amenée à classer mal certains flux, ces erreurs pourraient avoir des effets en termes de neutralité du net puisque tous les flux d'un même type ne seraient pas traités équitablement.

2.1.5 L'optimisation de la qualité de service

Certains services reposent sur de nombreux paramètres qui peuvent influencer sur la qualité de l'expérience utilisateur. Nombre de ces paramètres ne peuvent pas être pris isolément et il est nécessaire de les considérer dans leur ensemble pour mesurer leurs effets. Faute de connaître ces dépendances entre paramètres, il peut être inatteignable pour un humain de considérer l'ensemble des combinaisons possibles, mais ce type d'opération peut potentiellement être réalisé par une IA.

Un acteur auditionné a ainsi fait mention de deux services dont la qualité est affectée par de si nombreux paramètres que l'IA apparaît comme une solution adéquate pour en assurer une bonne gestion : la voix sur LTE et le débit de téléchargement en bordure de réseau. La qualité de ces deux services peut être affecté par environ 150 paramètres distincts et, par conséquent, modéliser manuellement l'influence de ces paramètres sur la qualité de l'expérience utilisateur s'avère complexe. Ainsi, peuvent être pris en compte les paramètres concernant l'environnement radio (qualité du signal perçu, distance avec l'antenne, etc.), la qualité de la connexion (nombre de paquets perdus, latence moyenne, etc ;) ainsi que des paramètres ayant trait à la couche applicative (comme par exemple la distance entre l'antenne et le serveur de transcodage). Compte tenu de leur diversité de nature, les paramètres qui peuvent influencer sur la qualité de la voix sur LTE ainsi que sur le débit de téléchargement peuvent difficilement être classés manuellement par ordre d'importance relative. Pour pouvoir améliorer la qualité de ses services, l'acteur auditionné a eu recours à l'apprentissage supervisé. Cette première étape a permis de filtrer les paramètres qui étaient les plus influents sur la qualité de l'expérience utilisateur puis de jouer sur ces paramètres pour améliorer la qualité de service. Le modèle a ensuite été adapté localement en ayant recours à de l'apprentissage par renforcement en tenant compte des retours faits par les utilisateurs.

2.1.6 La sécurité

Les attaques sont devenues plus nombreuses et plus sophistiquées (elles ont d'ailleurs possiblement recours à l'IA). Deux approches classiques de détection sont habituellement utilisées : la reconnaissance des caractéristiques de l'attaque déjà connues (appelées signature de l'attaque) et la détection d'une anomalie au niveau d'un comportement système ou réseau par rapport à des profils d'usages normaux prédéfinis.

Cependant, la reconnaissance des signatures d'attaques ne permet pas de détecter de nouvelles formes d'attaques non répertoriées et l'approche classique de la détection d'anomalies (notamment à travers une analyse statistique) peut devenir très complexe vu le nombre de variables à prendre en compte pour définir un « usage normal ». Dans ce contexte, faire appel à l'IA permet d'apprendre automatiquement à reconnaître un comportement anormal. Le défi ici est de faire en sorte que la solution basée sur l'IA ignore les petites variations de comportements qui pourraient générer des faux positifs tout en signalant bien les variations qui correspondent réellement à des attaques.

³

https://www.researchgate.net/profile/Shervin_Shirmohammadi/publication/335362817_Machine_Learning_and_Deep_Learning_Based_Traffic_Classification_and_Prediction_in_Software_Defined_Networking/links/5d62cf7b92851c619d76e8f1/Machine-Learning-and-Deep-Learning-Based-Traffic-Classification-and-Prediction-in-Software-Defined-Networking.pdf

Par ailleurs, l'augmentation du nombre d'attaques entraîne une augmentation du nombre d'alertes à analyser. L'IA permet ainsi d'aider à analyser le grand nombre d'alertes qui sont émises par les solutions de sécurité (qui est quasi impossible à traiter manuellement) et de les corréliser pour détecter des incidents ou de les anticiper. Par la suite, l'IA peut considérer les solutions à mettre en place pour répondre à ces incidents (cf. 2.1.2). Si l'utilisation de l'IA a longtemps été cantonnée à des travaux de recherche, plusieurs entreprises, dont certaines françaises, semblent aujourd'hui proposer sur le marché ce type de solutions notamment pour assurer la sécurité de réseaux d'entreprises.

En plus de l'IA connexionniste, l'IA symbolique, avec des approches déductives basées sur la connaissance des experts (système expert, graphes de connaissances), peut aider à améliorer la sécurité. Certains travaux de recherche tentent de coupler l'usage des IA connexionniste et symbolique dans le domaine de la sécurité. Outre les aspects liés aux attaques et à leur détection, l'IA peut permettre de mieux détecter les fraudes dans les réseaux de télécommunication en améliorant l'efficacité opérationnelle des analystes.

Si l'utilisation de l'IA n'est en tout état de cause, bien entendu, pas un gage de sécurité absolue, elle pourra contribuer à l'amélioration de la sécurité sur les réseaux.

2.2 Planification radio

Pour pouvoir optimiser la transmission des signaux sans fils, il est nécessaire de planifier le déploiement des différentes cellules et de paramétrer les antennes pour maximiser les zones couvertes par les antennes tout en minimisant les interférences. La planification radio nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres indépendants, y compris des paramètres sur lesquels l'opérateur n'a aucune influence (par exemple la météo), en particulier concernant les bandes de fréquences les plus hautes car plus sujettes à ces variables exogènes. En pratique, recourir à des modèles théoriques (ne faisant pas appel à l'IA) ne permet pas de résoudre les problèmes d'optimisation dans un temps suffisamment court pour pouvoir reconfigurer les éléments dynamiquement. En faisant quelques extrapolations, l'IA peut permettre de résoudre ces défis dans un temps convenable.

Dans cette partie, nous présentons des problèmes d'optimisation pour lesquels les équipementiers font appel à l'apprentissage automatique. Cette partie n'est pas exhaustive, et l'IA peut notamment être utilisée pour gérer l'accès au spectre (radio cognitive) ainsi que pour étendre les zones de couvertures mobiles avec des panneaux intelligents.

2.2.1 Le *beamforming*

Le *beamforming* permet d'utiliser plusieurs antennes omnidirectionnelles afin de simuler le fonctionnement d'une antenne unidirectionnelle. Pour cela, le *beamforming* consiste à créer des interférences constructives et destructives entre les faisceaux d'onde radio des différentes antennes, afin que le faisceau d'onde total soit concentré dans la direction souhaitée et minimisé ailleurs. Grâce à cette technologie, le signal émis par l'antenne est optimisé pour cibler l'utilisateur visé, ce qui permet d'étendre la couverture radio et de limiter les risques d'interférence entre les signaux destinés à différents utilisateurs.

Afin d'obtenir ce résultat, il faut jouer précisément sur les puissances et les phases des signaux émis par les différentes antennes. Pour construire les interférences permettant que le signal soit transmis dans la direction souhaitée, il est possible d'avoir recours à des modèles mathématiques en s'appuyant sur la théorie du signal ou de faire des approximations en s'appuyant sur des expériences passées. La première approche permet en théorie d'obtenir des résultats plus précis mais la complexité des modèles mathématiques qui permettraient de résoudre ces problèmes oblige à faire

un compromis entre efficacité et précision, si bien qu'il n'est pas possible en pratique de modéliser précisément les interférences causées par les différentes antennes dans des conditions réelles.

L'apprentissage automatique peut donc être utilisé en alternative ou en complément pour paramétrer les signaux émis depuis les différentes antennes. Une fois la direction d'émission connue, l'algorithme peut rapidement extrapoler à partir de configurations précédentes quelles sont celles permettant d'émettre dans la direction souhaitée. L'apprentissage automatique permet aussi de prendre en compte l'ensemble des paramètres (météo, environnement, nombre de terminaux...) pouvant affecter la transmission du signal. Cette solution est actuellement en phase d'expérimentation.

2.2.2 Le déploiement optimisé des cellules

L'apprentissage automatique peut également être mobilisé pour optimiser le déploiement des cellules mobiles⁴. En effet, les *small cells*, en particulier, sont particulièrement sensibles à leur localisation (notamment du fait de la hauteur des fréquences utilisées, *ie*, 26 GHz). Une mauvaise localisation de ces *small cells* n'apporterait pas la qualité de service maximum ou nécessiterait un sur-investissement pour atteindre une telle qualité de service.

Dans ce contexte, sur la base d'une cartographie précise de la qualité du réseau existant et des zones soumises à des pics élevés de demande (pour par exemple, identifier des zones de forte demande disposant d'une qualité de service faible), l'apprentissage automatique peut potentiellement permettre de planifier précisément les endroits où ces *small cells* devraient être déployées en priorité tout en minimisant les coûts de ces déploiements (par un nombre de déploiements réduits par rapport à une planification manuelle).

2.2.3 La localisation des terminaux

La géolocalisation fait désormais partie des services de base auxquels les utilisateurs font régulièrement appel. En plus de permettre le développement de nombreux services destinés aux utilisateurs finaux, la localisation des utilisateurs peut permettre aux opérateurs de mieux gérer leurs réseaux, par exemple pour la fourniture de service instantané (par exemple pour orienter le faisceau créé par le *beamforming*) ou, à plus long terme, pour l'amélioration globale du service fourni (par exemple en aidant au déploiement optimisé de nouvelles antennes).

Si les systèmes satellitaires permettent d'obtenir une géolocalisation en extérieur précise à quelques mètres près (voire moins), leur précision diminue significativement à l'intérieur des bâtiments où les signaux satellites sont souvent trop atténués pour permettre une géolocalisation fine des utilisateurs. Une solution est alors d'utiliser des signaux mieux reçus à l'intérieur des bâtiments, comme les signaux des réseaux WiFi et cellulaires, pour se localiser. En pratique, il n'est pas optimal de faire appel à de la modélisation mathématique car la localisation de certains des équipements qui émettent ces signaux n'est pas connue. *A contrario*, l'apprentissage supervisé ne nécessite pas de connaître la localisation des antennes et permet d'extrapoler la position d'un terminal, et ainsi peut permettre de compléter efficacement, voire de remplacer, l'information des systèmes de géolocalisation satellitaires. Pour pouvoir recourir à de l'apprentissage supervisé, il est dans un premier temps nécessaire de disposer d'un jeu de données labélisées ; pour cela, des balises mesurent les puissances de signaux à des endroits précis. Comme pour le *beamforming*,

⁴ *Precision planning for 5G era networks with smallcells*, 5G Americas & Small Cell Forum Whitepaper, <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/10/SCF-Precision-Planning-WP-FINAL-1.pdf>

l'apprentissage automatique permet alors, à partir des signaux reçus par un équipement, d'extrapoler sa position à partir de signaux mesurés pour des localisations différentes connues.

2.2.4 L'inclinaison des antennes

L'angle d'inclinaison des antennes correspondant à une cellule, influe sur la zone géographique couverte par cette cellule. Pour pouvoir calculer l'angle d'inclinaison optimale permettant de maximiser la zone couverte ainsi que la puissance du signal reçu, il faut tenir compte de la topologie de l'environnement ainsi que des signaux émis par les antennes adjacentes. Ce paramétrage des antennes prend donc en compte de nombreux paramètres qui influent sur la propagation des signaux et les interférences. De fait, comme pour le *beamforming*, s'appuyer sur des modélisations définies « manuellement » par un opérateur pour la propagation des ondes ne semble pas optimal. Le recours à l'apprentissage automatique évite de recourir à une représentation exacte de l'environnement et donc de s'abstraire de l'ensemble des paramètres qui le caractérise en se focalisant sur les paramètres qui, par le passé, semblent avoir le plus influé sur la qualité du signal.

3 Les enjeux liés à l'IA

L'intelligence artificielle est une technologie très prometteuse et qui pourrait faire évoluer de nombreuses industries mais avant de la déployer dans des environnements critiques, notamment pour la prise de décision, il est nécessaire d'avoir conscience de certains enjeux. Sans être spécifique aux réseaux, cette section liste les défis liés à l'utilisation de l'IA sans mentionner ceux qui ont pu être abordés dans des notes précédentes comme les effets sur la structure d'emploi⁵ ou sur l'environnement⁶.

3.1 Les enjeux liés aux données

3.1.1 Un fort besoin de standardisation

L'intelligence artificielle s'est développée ces dernières années grâce aux vastes volumes de données disponibles et à la maturité des technologies sous-jacentes. Les réseaux et les équipements qui les composent sont en eux-mêmes une source importante de données, notamment grâce à la télémétrie activée.

Pour que l'IA puisse tirer parti de l'ensemble des données transmises par les différents équipements, il faut que celles-ci soient structurées en suivant le même format. Sans cela, toutes les données ne pourraient pas être interprétées, et l'apprentissage qui en serait issu serait erroné.

⁵ Une problématique similaire de compétence et d'organisation avait été soulevée dans la note sur la virtualisation des réseaux. Voir la section 2.2.2 : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseaux-du-futur-virtualisation-des-reseaux-juillet2019.pdf

⁶ En effet, comme d'autres technologie numérique, l'IA peut décarboner d'autres secteurs mais dispose elle-même d'une empreinte carbone considérable. En effet, la phase d'apprentissage d'une IA est très énergivore et il conviendrait d'en tenir compte lorsque l'on considère l'impact de l'IA sur l'environnement. Pour plus de détail sur l'empreinte carbone du numérique : <https://www.arcep.fr/actualites/les-communiqués-de-presse/detail/n/reseaux-du-futur-2.html>

La tâche apparaît particulièrement fastidieuse, notamment du fait de la multiplicité d'acteurs intervenant pour la fourniture de ces données. Pour répondre à ce besoin, différents groupes de l'ETSI⁷, qui standardise

les protocoles et architectures utilisés dans les réseaux télécom, travaillent depuis plusieurs années au développement de standards pour l'apprentissage automatique.

3.1.2 Disponibilité des données

La donnée est une ressource essentielle pour l'entraînement de l'intelligence artificielle ; de ce fait, la question de la propriété des données et de leur partage (dans le respect des principes de protection de la vie privée, du secret industriel et du secret des affaires et en préservant les incitations économiques des opérateurs et fournisseurs tiers à l'origine de leur collecte) est centrale. Les équipementiers auditionnés confirment qu'actuellement ces données restent la propriété des opérateurs télécoms, puisque elles sont collectées sur leurs réseaux.

Une plus grande disponibilité de ces dernières pourrait libérer un potentiel d'innovation important.

3.1.3 Propriété des modèles

Au-delà de la question de la disponibilité des données, la question de la propriété des modèles joue aussi un rôle clé.

En effet, un des acteurs auditionné indique que la question de la propriété du modèle résultant de l'apprentissage fait sur ces données peut se poser, lorsque le modèle est développé par un acteur différent (par exemple un équipementier). Après avoir entraîné son modèle sur un jeu de données détenues par un opérateur donné, un équipementier pourrait envisager de réutiliser ce modèle pour d'autres opérateurs. Cependant, un modèle d'IA est intrinsèquement lié aux données sur lesquelles il a été entraîné ; dès lors, établir clairement la propriété du modèle, une fois que celui-ci a été entraîné, peut s'avérer particulièrement complexe.

Pour autant, la réutilisation des modèles pourrait permettre de réaliser des gains d'échelle et favoriser l'innovation, que ce soit pour de la planification radio ou pour de l'optimisation de service⁸.

Une telle réutilisation peut toutefois poser des difficultés notamment en termes de secret des affaires. En effet, même s'il ne contient pas des informations aussi exhaustives que les données brutes qui ont servi à son entraînement, un modèle peut révéler des informations relatives à l'environnement sur lequel il a été entraîné. Une solution pourrait être de dégrader la finesse du modèle afin de s'assurer qu'il ne puisse pas révéler des informations trop précises, puis d'en transférer (contre rémunération) la propriété des opérateurs vers les équipementiers. Dès lors, si les équipementiers étaient propriétaires des modèles, ils pourraient les mettre à disposition des nouveaux acteurs qui souhaiteraient déployer des réseaux cellulaires. Ainsi, les nouveaux opérateurs n'auraient pas à souffrir d'une période d'apprentissage pour optimiser la configuration de leurs équipements.

⁷ Notamment les groupes «Experiential Networked Intelligence » et « Machine Learning for Future Networks including 5G »

⁸ A ce titre, il existe des travaux pour le développement de places de marchés spécialisées dans la mise à disposition de modèles d'IA.

3.1.4 Effet sur la chaîne de valeur

L'IA pourrait permettre de déléguer une partie de la configuration des équipements, ordinairement réalisée par l'opérateur, aux modèles développés par les équipementiers. Même si les opérateurs font déjà souvent appel aux équipementiers pour cette configuration, le recours à l'IA développée par les équipementiers renforcerait l'importance des équipementiers par rapport aux opérateurs (puisque ce sont ces derniers qui disposent des modèles). Pour autant, les équipementiers resteraient en partie dépendants des opérateurs dans la mesure où ceux-ci restent propriétaires des données indispensables pour l'entraînement des modèles.

Une alternative serait que les opérateurs conçoivent leurs propres modèles d'apprentissage ou fassent appel à des tiers, autres que les équipementiers, pour développer de tels modèles. Comme pour la virtualisation, le développement d'une telle expertise par les opérateurs pourrait les rendre moins dépendants des équipementiers.

3.1.5 Surreprésentativité de certains problèmes

Deux types de problèmes peuvent émerger et liés au biais de représentativité. Le premier biais de représentativité est parfois illustré par le « biais du survivant »⁹ qui consiste à ne s'intéresser qu'aux problèmes au sujet desquels des informations sont remontées. Si cette approche permet de traiter les problèmes les plus visibles, elle a pour conséquence d'ignorer les problèmes qui n'ont pas pu être remontés. Dans le cas de la gestion des réseaux, si des zones (géographiques ou logiques) sont équipées de moins de sondes ou représentent de plus faibles volumes de données, elles risquent statistiquement de signaler moins de problèmes. L'absence de détection d'incidents aurait pour conséquence de réduire le suivi et diminuerait le nombre de problèmes détectées dans une zone¹⁰.

Un autre biais de représentativité pourrait émerger lorsqu'une IA est entraînée sur un jeu de données spécifique. Dans le cas du *beamforming*, une IA qui aurait appris sur un parc d'équipements spécifiques à l'équipementier pourrait avoir un biais entraînant un niveau de précision dégradé sur le parc d'équipements hétérogènes d'un opérateur. Ces biais pourraient alors inciter les opérateurs à déployer un parc d'équipements spécifiques à un équipementier pour améliorer la précision de l'IA délivrée par ce dernier, augmentant par la même le niveau de dépendance de l'opérateur par rapport à l'équipementier. L'Autorité ne dispose pas d'éléments suffisants pour évaluer l'ampleur dans laquelle ce dernier point pourrait jouer et des recherches complémentaires seraient utiles.

3.2 Composer avec l'opacité de l'IA

3.2.1 Explicabilité et fiabilité

S'il est possible d'énumérer la liste des paramètres qu'un algorithme manuellement défini prend en compte et donner une idée de leur pondération, il est beaucoup plus difficile d'obtenir une telle liste

⁹ Un exemple de ce phénomène est celui des mesures de blindages d'avion de chasse proposées par les statisticiens durant la seconde guerre mondiale. En effet, ces derniers ne s'appuyaient que sur les avions rentrés à la base pour déterminer quelles étaient les zones à renforcer sans tenir compte du fait que les avions qui n'étaient pas revenus avaient sans doute été touchés à d'autres endroits.

¹⁰ Dans une moindre mesure, la variance dans la fréquence des différents types d'incidents peut aussi conduire à des biais. Un dysfonctionnement récurrent sera parfois surreprésenté dans l'ensemble de données ayant servi à entraîner l'intelligence artificielle, à l'opposé de la rareté de certains types de dysfonctionnements, qui peut les rendre moins facilement détectables.

pour un algorithme entraîné par apprentissage automatique¹¹. Ce manque d'explicabilité apparaît particulièrement prédominant pour certains algorithmes, en particulier dans le cas des modèles recourant au *deep learning*¹².

Or, sans connaître l'importance des différents paramètres dans une prise de décision, la réponse apportée par l'IA peut avoir un caractère imprévisible et il peut être difficile de juger de sa pertinence suivant les situations. Cela est d'autant plus problématique que l'IA ne peut argumenter les choix qu'elle prend.

En raison de cette absence d'explicabilité, il n'est pas toujours possible de rationaliser, pour un humain, le comportement de l'intelligence artificielle. Puisqu'il n'est pas possible de toujours anticiper clairement le comportement d'une IA, la question de sa fiabilité se pose. Ainsi, des chercheurs sont parvenus à faire croire à un algorithme de reconnaissance d'image qu'une tortue était une arme¹³. L'exemple est révélateur de l'imprévisibilité des résultats qui peuvent être fournis par une intelligence artificielle lorsqu'elle est mal entraînée ou qu'elle est utilisée dans un contexte inadapté.

Pour pallier à ce manque d'explicabilité, l'« IA explicable » *XAI*¹⁴ se développe avec pour objectif de comprendre et d'expliquer comment les IA prennent leurs décisions en inspectant les étapes et modèles impliqués dans le processus de décision.

3.2.2 Neutralité

Cette question de fiabilité de l'IA prend notamment une importance toute particulière vis-à-vis de la question de la neutralité du net. Sera-t-il possible de garantir que le trafic réseau géré dynamiquement par une intelligence artificielle respecte le principe de neutralité du net ?

La question est double car l'IA peut avoir plusieurs rôles dans la gestion de la priorisation des contenus et services. D'une part, elle peut faire des erreurs dans la classification de flux en vue de leurs priorisation. D'autre part, l'IA pourrait aussi servir à recommander des contenus et services à l'utilisateur ou à choisir quelle source sera utilisée pour fournir un contenu demandé par l'utilisateur. Cette problématique avait notamment été soulevée dans l'étude sur la neutralité des terminaux qui n'est pas, à ce jour, couverte par la neutralité du Net. Mais lorsque cette décision est prise par un équipement de l'opérateur (partie intégrante d'un service d'accès à internet) la question de la neutralité de l'IA entre de fait dans le champ de la réglementation relative à la neutralité du Net.

3.2.3 Corrélation et causalité

L'IA identifiant des phénomènes à partir de patterns, des phénomènes coïncidents pourront être jugés comme liés et le premier observé sera probablement considéré comme étant la cause du second, au contraire de certaines méthodes économétriques, par exemple, qui visent à clairement établir les liens de causalité entre phénomènes (lorsque les données pour le faire sont disponibles). En effet, la coïncidence de phénomènes peut n'être que le fruit du hasard et les deux phénomènes peuvent être indépendants¹⁵. En outre, deux phénomènes corrélés peuvent être produits par un

¹¹ <https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence>

¹² Ce problème ne concerne pas le champ de l'IA symbolique qui est, au contraire, en mesure d'expliquer les choix qu'elle opère

¹³ <https://www.wired.com/story/researcher-fooled-a-google-ai-into-thinking-a-rifle-was-a-helicopter/>

¹⁴ *Explainable Artificial Intelligence* ou Intelligence Artificielle Explicable.

¹⁵ Voir par exemple : <http://tylervigen.com/spurious-correlations>

même fait générateur commun, non observé celui-ci (on parle alors de variable omise) ; là encore, il peut donc y avoir corrélation sans causalité entre les deux phénomènes observés. Or si elle permet d'identifier des symptômes, l'IA ne permet pas toujours de dissocier les symptômes et les causes fondamentales d'un dysfonctionnement.

3.2.4 Responsabilité

En raison de cette opacité, les utilisateurs exigent des garanties élevées de la part de l'IA. En particulier, concernant le fonctionnement des réseaux que les opérateurs de télécom doivent fournir car ceux-ci sont essentiels. L'attribution de la responsabilité des décisions prises par l'IA n'est pas un débat nouveau¹⁶ de l'IA et ce débat est d'autant plus complexe à trancher quand il implique plusieurs acteurs. Actuellement, les équipementiers (ou d'autres acteurs) cherchent à fournir des garanties sur le fonctionnement de l'IA, mais il n'est pas établi que la responsabilité leur incomberait si une IA prenait une mauvaise décision d'optimisation ou de planification radio. D'une part l'acteur qui fournit les données qui entraîne l'IA pourrait avoir à vérifier que celles-ci sont exhaustives et cohérentes. D'autre part, des vérifications supplémentaires pourraient être effectuées quand une décision est prise par une IA.

Ces enjeux ne sont probablement pas exhaustifs de ceux qui se posent à l'IA dans les réseaux et d'autres thèmes auraient pu être abordés au sein de cette partie (cybersécurité, détection de comportements illégaux ...).

4 Conclusions

Les larges volumes de données collectées par la télémétrie, les efforts de standardisations ainsi que les nombreux cas d'usages laissent penser que l'Intelligence Artificielle pourrait significativement contribuer à l'optimisation et à l'évolution des réseaux dans les prochaines années. Les réseaux sans fils en particuliers sont amenés à se complexifier et l'IA permet déjà d'apporter des solutions aux besoins qui émergent avec le *beamforming*. Néanmoins, la disponibilité des données utilisées pour l'apprentissage, le manque d'explicabilité des décisions prises par l'IA et le manque de garanties dans certains cas pourraient ralentir le déploiement de cette technologie dans les réseaux. Ces défis ne sont pas spécifiques aux réseaux de télécommunications (pour lesquels les enjeux de sécurité et de résilience sont toutefois importants) et sont déjà étudiés. Seule la question de la propriété des modèles est peut-être plus spécifique aux domaines dans lesquels les acteurs qui développent les modèles ne sont pas ceux auxquels appartiennent les données ce qui semble être le cas pour le secteur des télécommunications.

¹⁶ https://www.lemonde.fr/idees/article/2016/12/01/comment-juger-les-machines_5041562_3232.html

Réseaux du futur

Note n° 7 L'agriculture connectée

14 janvier 2020

Introduction

Avec près de 14% de surface dédiée à l'agriculture, la France est dotée de l'une des plus grandes filières agricoles parmi les Etats européens. Ce secteur agricole est aujourd'hui confronté à de nombreux défis. Outre les enjeux de productivité, de souveraineté alimentaire et de traçabilité, le secteur agricole doit faire face, comme les autres secteurs de l'économie, aux défis environnementaux. Le secteur doit également faire face à des tensions importantes en termes de recrutement

Dans ce contexte, la numérisation des usages agricoles apparaît comme un levier de croissance à explorer¹. Connecter l'agriculture permet en effet le développement d'une agriculture de précision et automatisée, visant à réduire les coûts de production, l'utilisation d'intrants, mais aussi la pénibilité liée au travail agricole. Un tel développement repose en particulier sur la disponibilité de solutions de télécommunications adaptées.

La présente note expose, dans un premier temps, un panel d'usages numériques développés en réponse aux enjeux du secteur. Elle présente ensuite les solutions de connectivité associées et soulève la question de la gestion des données générées par cette connectivité croissante.

1 Le développement d'usages agricoles connectés

1.1 L'agriculture de précision

Un premier volet d'usages désigne les moyens permettant de développer une agriculture de précision, dont l'objectif est **l'aide à la décision** pour la conduite des exploitations. Son principe est de garantir l'utilisation de la bonne quantité d'intrants, au bon endroit et au bon moment.

Cette précision est notamment requise dans la mesure où chaque sol est caractérisé par une « réserve utile » qui correspond à sa capacité à stocker l'eau, l'azote et les différents produits

¹ La croissance annuelle du marché de l'agriculture de précision est estimée entre 15% et 20% entre 2018 et 2030 (Source : Etude Roland Berger pour la DGE)

phytosanitaires utilisés. Un sous-dosage ou un surdosage d'intrants² peut ainsi entraîner une perturbation de cette réserve et une chute de rendement significative. Il est donc important de pouvoir mesurer les paramètres caractérisant les sols afin d'approcher plus précisément la dose optimale d'intrants en chaque point des exploitations, correspondant à leurs réserves utiles.

Plusieurs entreprises, notamment françaises, ont développé des solutions permettant de déterminer ces doses plus précisément. Certaines sociétés proposent par exemple des solutions basées sur la géophysique des sols ; un capteur détermine la résistivité électrique³ des sols et un modèle traduit les données acquises en réserve utile. D'autres solutions peuvent également permettre une identification des adventices (plus couramment appelées « mauvaises herbes ») par analyse d'images au niveau du sol. C'est ainsi qu'il est possible de recourir au désherbage mécanique plutôt que chimique lorsque le mode de culture le permet. Il est également possible de réaliser une détection précoce des maladies des plantes avec des méthodes faisant appel à la génétique, permettant ainsi de limiter la quantité d'intrants nécessaire à leur traitement. Enfin des équipements de mesure de la maturité des plants en croissance existent, notamment pour la vigne, grâce à des méthodes optiques qui observent le processus de photosynthèse et l'état des plants. Ces données peuvent être traitées en temps réel ou *a posteriori*, en fonction des solutions de connectivités existantes.

Plusieurs solutions satellite sont également utilisées en agriculture de précision. En effet, une solution satellite permet de fournir des indicateurs d'état des sols, de l'irrigation ou de productivité à l'échelle d'un pays. Elle peut également permettre d'obtenir des cartes précises à l'échelle d'une exploitation : la définition des parcelles agricoles et la définition de modèles décisionnels pour l'agriculture de précision s'appuient ainsi fortement sur le satellite. L'utilisation de drones se développe également pour l'observation des sols et la cartographie des parcelles. Leur apport relativement au satellite réside dans leur capacité à générer des images sous la couche nuageuse ; ils présentent également l'intérêt d'une mise en œuvre peu coûteuse et moins contraignante pour l'exploitant agricole.

En combinant un ensemble de données décrivant la santé des plantes et les paramètres environnementaux, l'agriculture de précision permet ainsi de prédire les besoins des plantes en intrants, en termes d'eau, d'engrais ou encore de produits phytosanitaires. Elle donne aux exploitants agricoles des préconisations permettant une optimisation très locale des traitements. Cette optimisation contribue à un meilleur équilibre des sols tout en améliorant l'efficacité du secteur agricole. Elle permet de ce fait une réduction de l'impact environnemental des exploitations.

1.2 L'automatisation

Un second volet d'usages regroupe l'ensemble des technologies et services **permettant de faire fonctionner ensemble plusieurs outils d'exploitations**. Cette automatisation permet de fournir des services supplémentaires, notamment *via* le croisement des données des parcelles et de celles des équipements agricoles.

La connectivité d'engins agricoles permet par exemple d'envisager le pilotage de flottes de machines agricoles par guidage satellite et par connexion entre les différentes machines de la flotte⁴, de sorte à optimiser leur utilisation. Outre les gains en consommation énergétique, ce pilotage permet de limiter les manques et les recouvrements lors des passages des machines agricoles sur les parcelles,

² Les intrants sont les produits ajoutés dans le sol. On compte parmi eux les semences, les fertilisants, les produits phytosanitaires ou encore les activateurs ou retardateurs de croissance.

³ La mesure de la résistivité électrique des sols (ou conductivité) est une technique qui permet de caractériser l'hétérogénéité des sols (humidité, dessèchement etc.) et d'en tenir compte pour adapter les apports d'engrais et les traitements phytosanitaires.

⁴ Cette technique est appelée « platooning ».

d'optimiser les manœuvres en bout de champs, de coordonner différents équipements (par exemple pour le fauchage et la récolte) ou encore de guider précisément les équipements à travers les plants pour les pulvérisations ou les binages. Des entreprises proposent par exemple des tracteurs autonomes connectés entre eux. Ainsi, potentiellement, la conduite de certaines exploitations pourrait devenir très largement automatisée, avec une prise en compte des paramètres contextuels instantanés en appui sur une couche logicielle apprenante, sans l'intervention des exploitants agricoles. L'ensemble peut également être supervisé par des applications sur terminal mobile ou sur poste fixe, dès lors que les équipements sont connectés à un réseau hertzien.

Des solutions automatisées sont également très développées dans le domaine de l'élevage. Des outils de traite automatiques existent par exemple, permettant aux animaux de se diriger en toute autonomie vers ces appareils lorsqu'ils en ont besoin. Certains de ces appareils peuvent également analyser la santé des mamelles et ainsi détecter en amont la présence de mammites. D'autres solutions permettent le monitoring et le contrôle de la santé des animaux par le biais de capteurs. Ce type de capteur permet également de suivre la gestation des animaux afin d'anticiper le vêlage des bêtes, réduisant le taux de mortalité à la naissance. Ces solutions sont d'autant plus utiles que les animaux suivis ne sont pas toujours sur le même site d'une même ferme. Le développement de ces outils et l'automatisation de certaines pratiques sont ainsi de nature à améliorer la santé des animaux mais aussi les conditions de travail des éleveurs.

Si le déploiement de nouvelles techniques agricoles et d'élevage contribue à répondre aux enjeux de productivité, environnementaux, de compétitivité et d'attractivité du secteur agricole, ces usages dépendent de différentes solutions de connectivité.

2 Les besoins de connectivité associés

2.1 Des solutions fonctionnant essentiellement avec du débit faible

L'agriculture de précision s'appuie sur la récolte d'un ensemble de données descriptives de l'exploitation. Ces données peuvent être traitées a posteriori ou en temps réel en fonction des solutions de connectivité existantes.

En l'absence de réseau mobile, des solutions embarquées permettent d'acquérir des quantités variables de données qui seront traitées a posteriori pour alimenter des systèmes experts. D'autres solutions ont été développées sur de la connectivité faible débit telle que le Zigbee, ou encore les technologies LPWAN (Sigfox, LoRa) qui présentent des avantages économiques (faible coût) et énergétiques (faible consommation). Ces solutions permettent donc l'acquisition de faibles quantités de données, comme par exemple, des paramètres météorologiques. Une connectivité haut-débit n'apparaît ainsi pas comme un préalable à l'apparition et au développement de ces applications.

Si elle n'est pas indispensable, la connectivité au réseau de télécommunication mobile haut ou très haut débit apporte une dimension complémentaire pour la supervision des exploitations en permettant par exemple l'usage de la vidéo ou encore de l'imagerie aérienne. Pour l'agriculture de précision, elle permet également de récupérer en temps réel les données d'opération de chaque équipement et de les superposer aux données des parcelles, pour évaluer au fil de l'eau les performances et suivre les plans de production.

Certains cas d'automatisation peuvent fonctionner en l'absence de connexion aux réseaux de télécommunication. Par exemple, l'automatisation des engins agricoles d'une même flotte fait appel au guidage par satellite (GPS, Galileo,...) permettant ainsi un positionnement de grande précision. Un tel système est complété par le guidage par caméras embarquées, qui analyse le parcours des

machines en temps réel et protège les plants pendant les pulvérisations ou les arrachages d'adventices⁵.

La connectivité très haut débit enrichit les possibilités d'automatisation, permettant d'aller jusqu'à la supervision globale des exploitations agricoles, en ce qu'elle permet de connecter l'ensemble des outils d'exploitation. Un tel déploiement nécessite également des latences suffisamment faibles pour assurer la gestion des équipements à distance.

2.2 Un intérêt certain à de meilleures solutions de connectivité

1. Le développement d'usages plus performants

Si les solutions actuelles ont été développées en fonction des technologies de connectivité disponibles et ne nécessitent pas toujours de débits importants, de meilleures solutions de connectivité permettraient l'essor d'usages plus performants.

En effet, des débits plus importants offriraient une meilleure réactivité dans la prise de décision des exploitants agricoles. La combinaison d'analyse de paramètres en temps réels et d'informations contextuelles accessibles sur des bases de données ouvertes (météos, cartographie des sols...) peut permettre une action immédiate sur une exploitation lors du passage d'un équipement agricole. Pourrait alors être envisagé le traitement d'images haute définition en temps réel de sorte à développer des systèmes experts mettant à jour leurs décisions en fonction de données contextuelles.

Plus généralement, des débits plus importants permettraient d'envisager une systématisation de l'usage d'importantes bases de données. La consolidation de données agricoles sur des échelles géographiques et temporelles larges permettrait ainsi de mettre en œuvre des modèles agronomiques apprenants, optimisés en continu, et capables de s'adapter à des contextes dynamiques. La connectivité très haut débit apporte alors le double avantage de donner accès à des outils de supervision et de contrôle de flottes performants, et d'outils dynamiques d'aide à la décision.

Des expérimentations ont démontré la pertinence du très haut débit dans le secteur agricole. Dans le cadre d'un projet nommé « *Rural First*⁶ », des expériences de connectivité 5G ont été menées en Angleterre afin d'évaluer l'impact du très haut débit mobile et des réseaux d'objets connectés sur les exploitations agricoles. Déployés sur plusieurs exploitations, ces réseaux ont permis de réaliser des tests sur plusieurs types d'élevages. Les premiers retours d'expérience mettent en avant des résultats positifs sur l'évolution des métiers. En effet, le réseau 5G permet le suivi des animaux sur un périmètre géographique plus étendu que le celui des solutions existantes⁷. Une autre application est celle de la téléconsultation des vétérinaires en vidéo très haut débit.

Ces expérimentations ont toutefois été réalisées sur des parcelles qui n'étaient préalablement pas dotées de couverture mobile, ne rendant pas les résultats imputable à la connectivité 5G en tant que telle⁸. Elles n'en mettent pas moins en évidence les évolutions associées à une couverture mobile aux débits importants.

⁵ La télédétection est également possible par avions ou drones.

⁶ Projet développé en partenariat avec Cisco, l'Université de Strathclyde, et un consortium d'acteurs privés gouvernementaux et académiques (<https://www.5gruralfirst.org/what-is-5gruralfirst/>)

⁷ Les solutions de connectivités fixes se limitent généralement à l'intérieur des bâtiments, rendant inopérants les colliers de suivis des animaux en extérieur.

⁸ Des solutions 4G peuvent suffire au développement de certains de ces usages. Elles peuvent par ailleurs, en fonction des fréquences considérées, permettre une meilleure couverture que la 5G.

2. Une évolution des relations entre les agriculteurs et leurs fournisseurs de services

Au-delà des questions de débits et d'usages pouvant être développés, les enjeux de couverture rejoignent également la question des modèles d'affaires de l'exploitation.

En l'absence de couverture, les équipements employés sur les exploitations fonctionnent principalement à partir de systèmes embarqués propriétaires. Ces équipements représentant des coûts fixes importants, les exploitants agricoles dépendent fortement des solutions offertes par leurs fournisseurs. Or, des solutions alternatives se développent pouvant être adoptées plus facilement sur les équipements des exploitants agricoles mais nécessitant une couverture mobile. Une couverture mobile plus étendue rend ainsi possible l'arrivée de nouveaux entrants sur le marché. De plus, de nouvelles modalités contractuelles peuvent être proposées par ces acteurs, nécessitant un investissement moindre pour les exploitants (location ou abonnement). Ces solutions alternatives offrent alors aux exploitants une meilleure souplesse dans la gestion de la croissance de leur activité et du changement d'échelle, là où les solutions embarquées nécessitent des évolutions d'infrastructure plus importantes.

Si cette couverture peut être rendue possible par le déploiement de réseaux mobiles (haut ou très haut débit), les réseaux satellites présentent un avantage considérable pour la couverture des grandes exploitations, en site isolé ou au relief compliqué. Les évolutions en cours de la norme 5G au sein du 3GPP et leur prise en compte des bandes satellites rendent ainsi probable un scénario d'appropriation du satellite pour l'agriculture.

3 Une dépendance aux données de plus en plus forte

3.1 Une combinaison de données nécessaire pour l'aide à la décision

Durant les premières phases de développement de l'agriculture numérique, des efforts importants ont permis l'apparition de nombreuses méthodes et technologies d'acquisition des données agricoles⁹ permettant de construire et de faire évoluer des modèles de conduite des exploitations agricoles. Cette collecte de données quantitatives et fiables est un prérequis pour une agriculture numérique robuste et performante.

Au-delà de la question de la collecte de données se pose celle de leur mise en relation. Comme dans de nombreux secteurs numériques, c'est bien la combinaison de multiples données, leur standardisation et le traitement de ces bases de données importantes qui sont créateurs de valeur. La construction de modèles agronomiques sur la base de ce recoupement de données offre en effet la possibilité de simuler et d'anticiper la conduite des exploitations et de prédire les rendements en fonction d'un ensemble de paramètres agrégés. L'accessibilité à des sources de données multiples permet ainsi d'envisager une généralisation de l'utilisation d'outils d'aide à la décision.

3.2 Une concentration d'acteurs et un risque de dépossession de la donnée agricole

Il existe une surabondance de plateformes de données agricoles entraînant un manque de lisibilité et des difficultés d'appropriation pour les exploitants agricoles. Des start-up issues de la recherche sont souvent pionnières des systèmes d'informations géographiques et rendent accessibles les données agronomiques qu'elles génèrent. Les exploitants agricoles sont largement demandeurs de ces solutions d'aide à la décision, mais l'atomicité du secteur rend difficile leur appropriation de ces

⁹ Mesures génétiques (identification de pathogènes par étude de l'ADN d'échantillons), mesures biologiques, mesures géophysiques, mesures optiques, analyses d'image, données météorologiques...

outils. Les acteurs capables d'intégrer de multiples sources de données dans une plateforme unique trouvent ainsi un avantage concurrentiel certain.

Les grands équipementiers agricoles se sont positionnés sur ce créneau. Leur objectif est ainsi de construire un savoir-faire en capitalisant sur l'analyse des données relevées et télétransmises lors de l'utilisation de leurs équipements sur les exploitations. Ces acteurs peuvent ainsi profiter de leur position déjà acquise sur le marché des équipements agricoles pour acquérir d'importantes quantités de données et ainsi proposer des solutions plus performantes, conduisant à un effet de réseau susceptible de consolider encore leur position.

D'autres acteurs se positionnent sur ce secteur. Si quelques coopératives agricoles proposent des solutions de partages de données et de conseils de leurs membres, des « géants » du secteur agricole, tels que de grandes coopératives sont également présents.. Un « géant » de l'agro-alimentaire, également, a récemment investi 1 milliard de dollars dans une plateforme numérique pour assurer son implantation en Europe. Enfin, certains « géants » du numérique se positionnent désormais sur ce marché prometteur, investissant dans l'acquisition de jeunes sociétés pour combler leur retard et établir de nouveaux standards de performance. Une intégration progressive des acteurs des secteurs agricole, pharmaceutique et numérique est ainsi observée.

Conclusion

Si la connectivité des solutions agricoles apparaît comme une composante importante pour rendre l'agriculture plus performante, efficiente et par conséquent plus compétitive, la collecte et la combinaison de bases de données en masse sont les facteurs essentiels pour la traduire en gains effectifs. Comme pour de nombreux autres secteurs, le secteur agricole rentre lui aussi dans l'air du « big data », pouvant conduire à la concentration de données aux mains d'un faible nombre d'acteurs.

Dans cette configuration, de nouveaux schémas de dépendance pour les exploitants agricoles peuvent émerger et conduire à une perte de souveraineté à l'échelle de l'exploitant, mais aussi à l'échelle nationale.

Accompagner l'essor des réseaux pour permettre le développement des usages numériques et répondre aux enjeux du secteur agricole est donc indispensable, mais soulève la question de la gestion des données alors générées. Le sujet du partage et de l'accès de ces données, dont certaines peuvent avoir un caractère d'intérêt général, doit alors être géré en coordination avec les autorités compétentes.