

Plateforme de travail « Pour un numérique soutenable »
Atelier 5 « Façonner les réseaux pour un numérique soutenable »

24 novembre 2020

Chaque réseau est composé de « tuyaux » et d'équipements qui visent à optimiser son efficacité. Quelles sont les solutions d'optimisation de l'impact environnemental en fonction du trafic ? Existe-t-il des architectures de réseaux plus efficaces que d'autres ? Quels gains peut-on attendre en veille des réseaux ?

1 Introduction

Les réseaux télécoms sont constitués d'éléments centraux appelés « cœur de réseau » et d'éléments capillaires appelés « réseau d'accès », reliés entre eux par des liens dits « liens de collecte ». Ces réseaux d'accès peuvent être des réseaux dits « fixes » (réseaux filaires – comme le cuivre, le câble, la fibre... – ou hertziens – satellites, TDH radio...) ou des réseaux « mobiles » (2G, 3G, 4G, 5G). Un « site mobile » ou « station de base » désigne les antennes et équipements radios associés des opérateurs mobiles installés sur des pylônes, au sommet de châteaux d'eau, sur des toits-terrasse, etc.

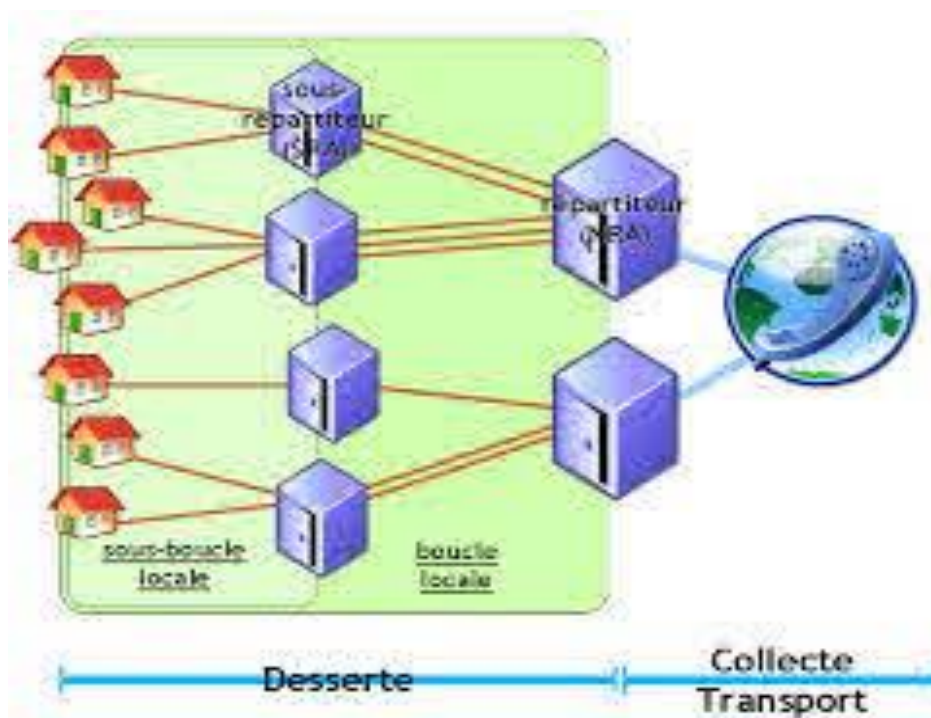


Figure 1 - Exemple d'architecture d'un réseau fixe

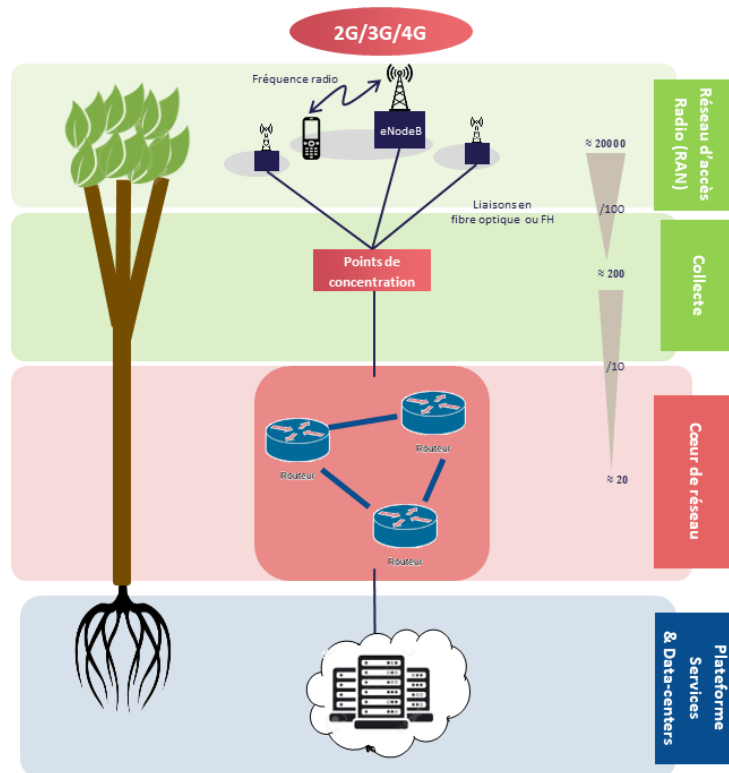


Figure 2 - Illustration de l'architecture d'un réseau mobile 2G/3G/4G et analogie avec un arbre

La contribution des réseaux télécoms à l'impact environnemental du numérique a donné lieu à plusieurs évaluations, principalement orientées sur les enjeux de consommation énergétique qui ont notamment permis de mettre en lumière les éléments ci-dessous. Les enjeux d'impacts environnementaux au-delà des émissions de GES (matière, minerais, ressources abiotiques...) sont pour l'instant relativement peu abordés dans ces études.

- **C'est la partie accès qui représente la part majeure de la consommation énergétique des réseaux** [1] ; cette part se chiffre à 70%-80% selon des estimations issues de modélisation [3] et corroborées par des mesures sur des réseaux réels¹. Les 30% restants se répartissant entre la collecte/le cœur de réseau (environ 5-10 %) et la partie IT/Centres de données (environ 10-25 %).
- [FranceStratégie-2020] La facture énergétique des réseaux d'accès mobiles dépend principalement du nombre de sites de l'opérateur et de leur renouvellement, de la capillarité du réseau et du trafic. A l'inverse, la consommation énergétique dans le cœur de réseau est portée davantage par le trafic.
- Les facteurs et les profils de consommation énergétique de ces réseaux d'accès varient selon qu'il s'agit de réseaux fixes et mobiles :
 - **Pour les réseaux d'accès mobile, la principale source de consommation est le site mobile.** Aussi, [1] la consommation énergétique du réseau dépend principalement de leur nombre, c'est-à-dire de l'empreinte géographique (couverture) du réseau, et de leur renouvellement.

¹ A l'occasion d'un séminaire organisé par France Stratégie le 13 mars 2018, Orange indiquait que 70% de la consommation énergétique dans son réseau mobile est dévolue à la partie accès.

La consommation énergétique par utilisateur est quant à elle proportionnelle à la densité d'utilisateurs dans la zone de couverture. **Pour optimiser l'architecture des réseaux mobiles et réduire leurs consommations énergétiques, il est important de connaître finement la répartition géographique du trafic et son évolution.** En effet, selon Nokia [8], seulement 30% du trafic génère 75% de la consommation énergétique totale du réseau mobile : les zones à faible trafic - typiquement les zones rurales qui représenteraient en moyenne un tiers du parc des sites d'un opérateur moyen – présenteraient ainsi le plus grand potentiel d'économie d'énergie², *via* la mobilisation des leviers présentés *infra*.

- **Pour les réseaux d'accès fixes, la consommation énergétique du réseau dépend essentiellement de celle équipements en extrémité du réseau** (par exemple, les box internet), dont le nombre est généralement égal à celui des utilisateurs du réseau. Or, selon les résultats d'une modélisation [3], ces équipements ont une consommation largement constante et indépendante du trafic de l'utilisateur. **En première approche, la consommation énergétique du réseau dépend donc directement de celle de l'équipement considéré et du nombre d'utilisateurs**

Enfin, **la consommation des centres de données**, si elle reste minoritaire dans la consommation totale des réseaux de télécommunications, représente déjà près de 2,7% de la demande en électricité de l'UE [16] et **connaît une augmentation significative³, en raison notamment de l'essor des services informatiques en nuage (cloud)**. Cette augmentation a, semble-t-il, plus que neutralisé les gains d'efficacité réalisés tant au niveau matériel que logiciel. Alors qu'en 2010, les centres de données d'informatique en nuage (Cloud) ne représentaient que 10% de la consommation totale des centres de données, ce pourcentage est passé à 35% en 2018 et devrait atteindre 60% en 2025. En parallèle, la part des centres de données déployées en périphérie de réseau des opérateurs télécoms devrait augmenter de manière significative d'ici 2025 et peser 12% de la consommation énergétique de l'ensemble des centres de données de l'UE.

2 Problématisation

Pour étudier l'impact de l'architecture des réseaux sur l'empreinte environnementale et établir comment façonner/optimiser ces architectures, **il existe deux angles d'approche complémentaires : les leviers physiques** c.-à-d. relatifs à l'infrastructure et aux aspects matériels pour façonner l'architecture des réseaux **et les leviers logiques** c.-à-d. relatifs à la façon d'opérer les réseaux pour optimiser leurs architectures et leurs efficacités (bien que la démarcation entre les deux angles n'est pas stricte).

Conformément à une approche d'analyse par cycle de vie de l'architecture des réseaux, il est primordial d'examiner l'impact environnemental de chaque levier tant sur le plan énergétique que sur le plan de consommation de matière.

² Les sites dans les zones moins denses suivent en général un cycle de vie plus long que les sites dans les zones urbaines en raison de l'accroissement plus intense du trafic en urbain qu'en rural.

³ L'étude montre que par rapport à 2018, la consommation énergétique des centres de données en UE devrait augmenter de 21% pour atteindre 92,6 TWh/an en 2025.

2.1 Des leviers physiques pour façonner l'architecture des réseaux

2.1.1 Faut-il privilégier une architecture de réseaux distribuée ou bien centralisée ?

L'architecture d'un réseau est dite centralisée lorsque les équipements de traitement des données (centre de données) sont éloignés des utilisateurs, et situés dans des nœuds plutôt en amont du réseau. Une architecture de réseau peut être distribuée (décentralisée) *via* le déport des équipements à un niveau plus proche des utilisateurs (par exemple, au niveau d'un site mobile) pour répondre aux évolutions de la demande ou assurer une qualité de service nécessaire à certains usages spécifiques.

Les conséquences environnementales du choix entre une approche architecturale centralisée ou distribuée des réseaux devraient être analysées à la fois sous l'angle de la consommation énergétique que sous l'angle de la consommation de matière.

L'impact de la centralisation/décentralisation des réseaux sur leur consommation énergétique est ambigu, ainsi que le montrent les deux exemples de technologies présentés ci-dessous : le « **Edge/Fog Computing** » et le « **Centralized/Cloud RAN** ».

a) L'exemple du « Edge/Fog Computing », une décentralisation au plus près des utilisateurs

Le « Edge/Fog Computing » s'applique aussi bien pour les usages fixes que pour les usages mobiles et consiste à disséminer les équipements de traitement de données au plus proche des utilisateurs, en remplaçant les « gros » centres de données centralisés par des « mini » centres de données traitant l'information à un niveau proche des utilisateurs (par exemple, au niveau d'un site mobile), et en moins grande quantité (car plus localisés).

Les « mini » centres de données, abritant les serveurs de proximité dits « serveurs Edge », ont généralement une efficacité énergétique⁴ plus grande que les centres de données classiques [6] : la décentralisation permettrait ainsi de réduire la consommation énergétique du réseau en s'approchant des utilisateurs (puits de trafic) etc.

A l'inverse, d'autres arguments pointent les inconvénients d'une telle architecture : la multiplicité des « mini » centres de données pourrait augmenter la consommation énergétique totale si leur répartition géographique n'est pas correctement étudiée, augmenter la complexité opérationnelle et le coût énergétique de leur gestion, et faire perdre les avantages de la centralisation qu'on retrouve généralement dans l'informatique en nuage (cf. ci-dessous). En particulier, le caractère centralisé de certains grands centres de données (par exemple ceux d'IBM, Microsoft, Amazon, Google ou Netflix) peut leur permettre de s'organiser de sorte à bénéficier d'une bien meilleure efficacité énergétique que la moyenne [4], en mettant en œuvre une architecture centralisée spéciale dite « hyperscale » qui utilise la « virtualisation » (cf. *infra*). Par ailleurs, au-delà de l'aspect énergétique, des interrogations peuvent émerger sur l'impact d'une telle architecture, à base de mini centres de données, en termes de multiplication des équipements.

Néanmoins, il est à noter que l'émergence du Edge Computing n'est pas exclusive de la centralisation, les deux types d'architecture devraient cohabiter pour supporter la diversité des usages à servir ainsi que d'autres considérations de l'opérateur (stratégie de différenciation, coût ...) [16].

Il est difficile de se prononcer fermement sur le degré de décentralisation de l'architecture qui pourrait affecter positivement le bilan environnemental, au regard de la multiplicité des

⁴ Pour les centres de données, la métrique d'efficacité énergétique couramment utilisée est la « Power Usage Effectiveness » (PUE).

facteurs à prendre en compte (la localisation des mini-centres de données, l'impact sur les liens de collecte associés, le type de services hébergés etc.). Concernant les effets positifs de la décentralisation, selon une modélisation [6], le recours à une architecture fortement distribuée permet de réduire la consommation énergétique jusqu'à 14% par rapport à une architecture centralisée et jusqu'à 25% par rapport à une architecture partiellement distribuée. Une étude [9] montre que dans le cas du mobile, le Edge Computing combiné au report du trafic sur des petites cellules permet d'économiser plus de 90% de l'énergie pour certains usages consommateurs en données (ex. réalité augmentée, réalité virtuelle, services vidéo).

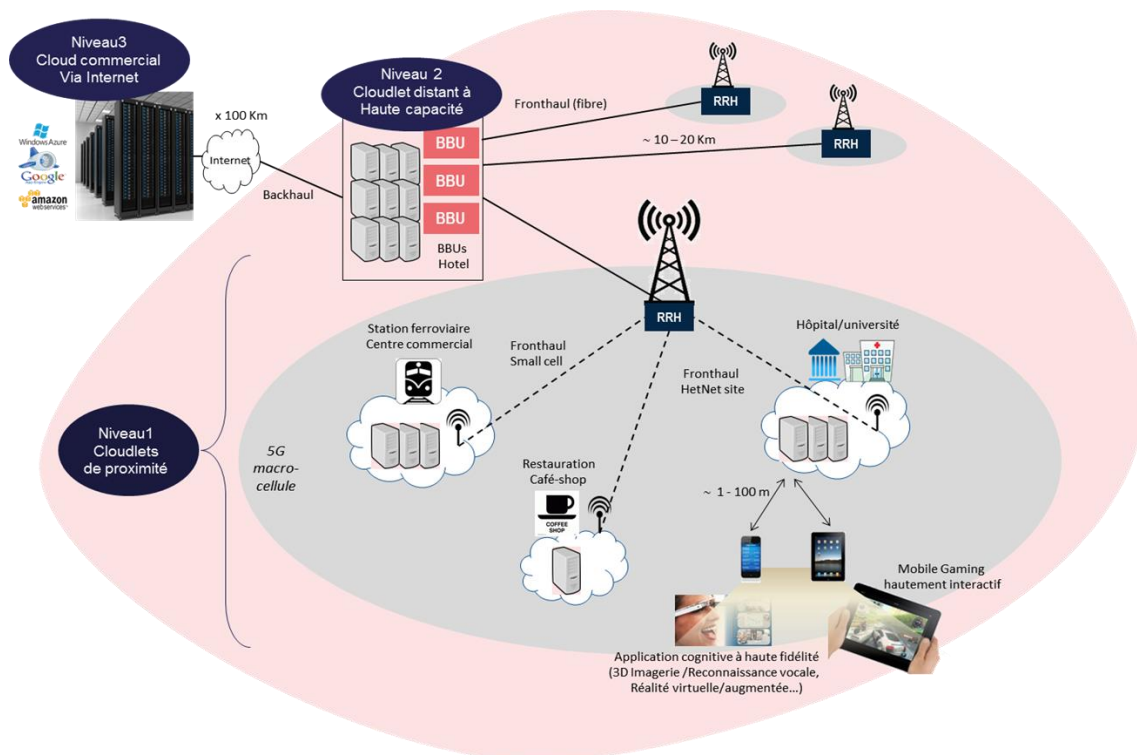


Figure 3 - Illustration d'une architecture où le Edge Computing cohabite avec le Cloud traditionnel

b) L'exemple du « Centralized/Cloud RAN » (C-RAN) pour les réseaux mobiles

Un site mobile se compose de plusieurs éléments, dont une tête radio (« *remote radio unit* » ou RRU), qui émet et reçoit le signal, et une « *base band unit* » (BBU), qui contrôle et traite ce signal. L'architecture C-RAN consiste à déporter et à centraliser (et à terme « virtualiser ») - c'est-à-dire que le fait de fournir sous forme de logiciel des fonctions auparavant assurées d'un point de vue matériel, cf. infra) les BBU dans un centre commun (appelé « hôtel de BBU »). Le schéma ci-dessus montre un exemple d'architecture C-RAN.

La centralisation et la virtualisation des BBU permettraient de réduire la consommation énergétique des réseaux mobiles en mutualisant certaines fonctionnalités énergivores (notamment le système de refroidissement sur les sites) et en optimisant l'allocation des ressources entre les têtes radios pour mieux coller au trafic instantané des utilisateurs. La virtualisation des BBU centralisés pourrait permettre dans certains cas, en optimisant leurs usages, d'en diminuer le nombre. L'implémentation du C-RAN nécessite une connaissance fine de la répartition géographique du trafic et de sa dynamique, ainsi que le recours à des liens de collecte plus performants pour pouvoir assurer une connectivité suffisante entre les têtes radios et le centre commun de BBU [2].

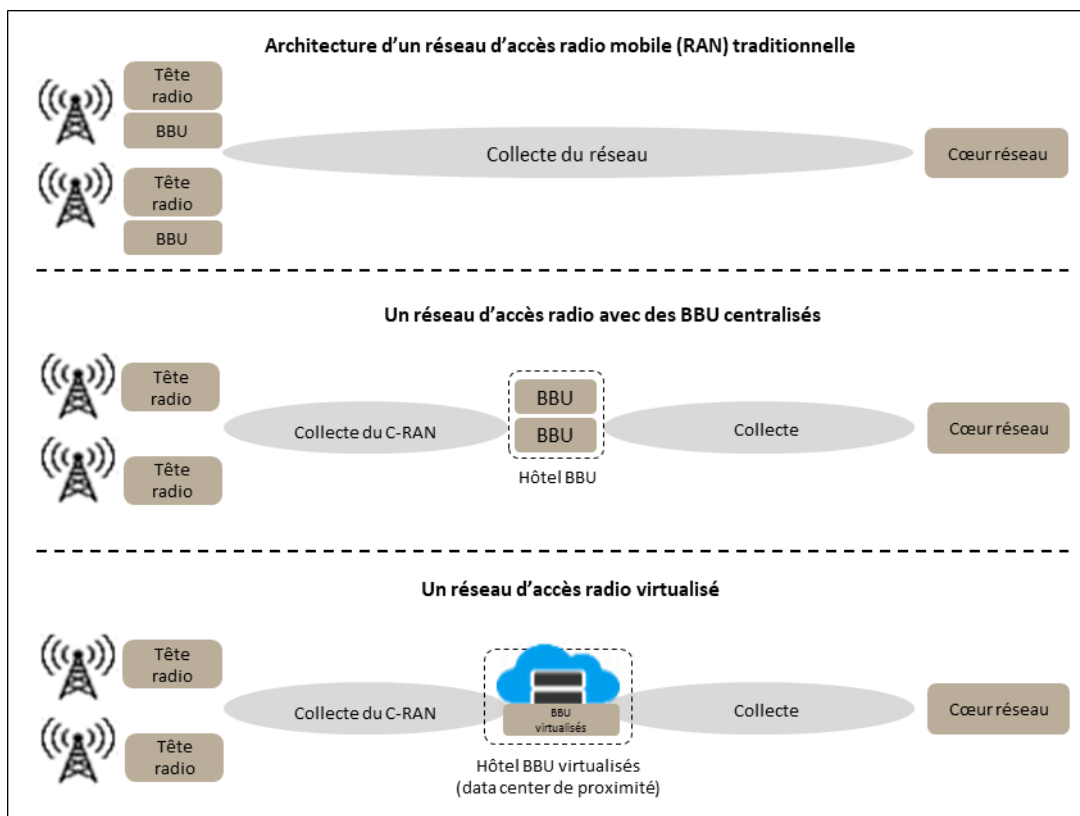


Figure 4 - Illustration d'une architecture C-RAN/vRAN vs une architecture d'accès mobile traditionnelle

2.1.2 Quel bilan environnemental pourrait-on attendre des petites cellules (« small-cells ») déployées dans les réseaux mobiles ?

Les petites cellules correspondent à de « mini-sites mobiles », de faible puissance et de faible portée (environ 100m). Jusqu'ici non déployées massivement en France, les petites cellules peuvent correspondre à un choix d'architecture (pour augmenter localement la capacité des réseaux mobiles et/ou cibler de façon « chirurgicale » les « puits de trafic » ex : sortie d'un métro) ou être déployées par contrainte physique (pour exploiter des bandes de fréquences hautes par exemple la bande millimétrique (ex. 26 GHz), de faible portée).

Le recours à des petites cellules, en complément des sites mobiles « classiques », offre des opportunités pour reporter le surplus de trafic des sites classiques sur les petites cellules – à condition que celles-ci ciblent bien les poches de trafic [14] – et pour activer le mode veille plus efficacement et sur des périodes plus longues sur les petites cellules où aucun trafic n'est recensé. Le recours aux petites cellules évite ainsi le besoin de densifier le réseau par l'installation des sites mobiles « classiques » caractérisés par une plus forte consommation énergétique que les petites cellules.

Une étude [9] réalisée sur un réseau mobile 4G estime par exemple que le report du trafic sur les small-cells est particulièrement efficace pour les usages data à fort débit (ex. vidéo, réalité virtuelle ...) et permettrait de réduire plus de 90% de la consommation énergétique de l'accès radio ; cependant le report du trafic sur les petites cellules risque potentiellement d'augmenter la signalisation due à la mobilité des utilisateurs (bascule entre small-cells). Par ailleurs, quand on s'interroge sur l'impact environnemental des small-cells, il faut prendre en compte, au-delà de l'impact énergétique, la

consommation de matière due à une potentielle multiplication de ces équipements malgré leur taille réduite.

2.1.3 Quel bilan environnemental pourrait-on attendre d'une mutualisation des réseaux entre opérateurs ?⁵

Plusieurs niveaux de mutualisation existent :

- Le partage des infrastructures dites « passives » dans les réseaux fixes ou mobiles, c'est-à-dire que seule l'infrastructure est partagée (pylônes, génie civil, fourreaux, câbles, locaux techniques, alimentation électrique, climatisation...). Ce partage est déjà répandu en France, notamment sur les réseaux en fibre optiques jusqu'à l'abonné (réseaux FttH).
- La « mutualisation active » des réseaux fixes ou mobiles, qui correspond, en plus du partage précédent, au partage d'équipements dits « actifs », (équipements réseaux des stations de base, contrôleurs des stations de base, commutateurs et brasseurs dans un réseau fixe ...), qui injectent et traitent le signal dans les infrastructures susmentionnées. Par exemple, Bouygues Telecom et SFR ont mutualisé de cette façon leurs réseaux mobiles en dehors des grandes agglomérations ;
- La « mutualisation active avec mutualisation des fréquences » entre opérateurs de réseau mobile (ex : pour le déploiement de la 4G par les quatre opérateurs dans les zones blanches)

Dès lors, il se pose la question du gain environnemental qu'on pourrait attendre des différents niveaux de mutualisation tant en termes de consommation énergétique que de consommation de matière. Selon une étude d'un projet de recherche européen GreenTouch [5] par exemple, la mutualisation active des réseaux mobiles pourrait permettre une réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 50% par opérateur en zone urbaine et de 75% par opérateur en zone rurale.

2.1.4 Au niveau des réseaux mobiles, quel bilan environnemental pourrait-on attendre des réseaux dits privés (déploés notamment à l'intérieur de certains bâtiments) et de leur articulation avec les réseaux publics de Bouygues Telecom, Free Mobile, Orange et SFR ?

Quelle solution technologique optimale d'un point de vue environnemental pour apporter la connectivité dans l'espace privé (locaux d'entreprises, usines, aéroports ou autres hubs logistiques ...) : densifier davantage le réseau mobile à l'extérieur ? installer des solutions indoor mobiles spécifiques (exemple, le système d'antennes distribuées dans l'immeuble et raccordées aux réseaux des opérateurs de réseau mobile) ? privilégier les solutions radios raccordées aux réseaux fixes (exemple, technologie WiFi) ?

2.1.5 Pourrait-on capitaliser sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements afin de réduire leur impact durant la phase d'usage ?

Se focaliser exclusivement sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements, par un renouvellement des équipements déjà installés dans les réseaux, pourrait se heurter toutefois au transfert de l'impact environnemental sur les autres phases de cycle de vie du réseau (besoin de renouvellement/mise en rebus anticipée des équipements).

- Selon une étude de l'IDATE [8], le renouvellement du parc d'équipement dans les réseaux mobiles permet de gagner jusqu'à 30% sur chaque site. Le renouvellement est l'occasion de repenser la

⁵ Ce sujet soulevant par ailleurs de forts enjeux réglementaires sur l'investissement et la concurrence – non abordés ici

disposition des éléments sur le site et leur refroidissement – une source d'économie supplémentaire (selon Nokia [8], le refroidissement représente près de 50% de la consommation actuelle des sites)

- La même étude [8] indique une amélioration de l'efficacité énergétique dans les systèmes à antennes dites « actives » (capables de *beam forming*, c'est-à-dire de concentrer le faisceau dans une direction spécifique) : en effet, les prochaines générations d'antennes actives seront, par rapport à 2019, 25% plus efficace en 2021 et jusqu'à 40% plus efficace en 2023.

2.2 Des leviers logiques pour mieux opérer les réseaux

2.2.1 Quels sont les gains énergétiques et quelles sont les conséquences de la mise en veille des équipements dans les réseaux fixes et mobiles ?

L'activation du mode veille figure parmi les leviers les plus importants pour réaliser des économies d'énergie, son efficacité dépend des critères de sa mise en application (notamment l'arbitrage performance/consommation) et de la bonne compréhension de la répartition journalière du trafic, ceci s'applique aussi bien pour les réseaux mobiles (la mise en veille des équipements d'un site mobile), pour les réseaux fixes (la mise en veille des équipements terminaux chez l'abonné comme la Box) et pour les terminaux (certaines applications actives en arrière-plan continuent de solliciter constamment les réseaux). Dans le cas particulier des réseaux mobiles, la mise en veille ne peut être activée qu'en deçà d'un certain seuil d'activité de trafic dans le site, ce qui limite l'application de ce levier à certains sites chez l'opérateur et à certains créneaux horaires de la journée.

La 5G offre la possibilité d'activer plusieurs modes veille standards : des modes veilles à faible impact sur la performance et permettant d'atteindre jusqu'à 20% d'économie d'énergie ; des modes veilles plus profonds avec 90% de réduction mais potentiellement un impact sur la latence (le temps de réactivité du réseau) si les modes sont mal exploités [8] [7].

2.2.2 Qu'en est-il des solutions d'automatisation, d'optimisation et d'auto reconfiguration des réseaux basées sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage ?

Les solutions basées sur l'intelligence artificielle (« Artificial Intelligence » (IA))/l'apprentissage (« Machine Learning » (ML)) interviennent sur l'ensemble de la chaîne du réseau comme support pour catalyser l'effet d'économie d'énergie de certains leviers (par exemple pour l'activation du mode veille, pour l'optimisation en temps réel des capacités du réseau en fonction de la demande, la mise en œuvre des réseaux auto-reconfigurables etc.); cependant les solutions IA/ML sont encore balbutiantes et nécessitent plus de maturation tant au niveau de leur conception que de leur maîtrise par les opérateurs [12].

L'IA/ML présente un potentiel de réduction de 10%-20% de la consommation énergétique des réseaux mobiles alors que le gain dans les réseaux fixes est estimé à 5% d'après [8] et [7]. Selon [7], l'IA permet à Google d'économiser plus de 30% de la consommation énergétique dans ses data-centers.

Les solutions IA/ML reposent souvent sur des calculs intensifs opérés par des serveurs porteurs eux-mêmes de leur propre impact environnemental, d'où la nécessité de raisonner en impact net de la solution. Faudrait-il mutualiser les IA/ML (afin d'éviter d'avoir à réaliser l'apprentissage sur chaque réseau d'opérateur) et capitaliser ainsi sur des économies d'énergie ? Comment concilier cette mutualisation avec la spécificité du réseau de chaque opérateur – marqueur de sa différenciation ?

2.2.3 Qu'en est-il de l'impact environnemental de la virtualisation, la logicialisation des réseaux et à terme leur « cloudification » ?

La virtualisation et la logicialisation des réseaux sont deux technologies qui reposent sur la séparation entre le matériel et le logiciel afin que les fonctionnalités d'un réseau (ex. transmission et routage, filtrage et inspection du trafic, traitement) – réalisées jadis sur des équipements dédiés – puissent s'exécuter sur des équipements standards de type serveur x86 (virtualisation) et de rendre les réseaux programmables par voie logicielle (« Software Defined Networks » ou SDN) [10] [11] .

La virtualisation offre une plus grande flexibilité dans l'exécution et la localisation des fonctionnalités, permettant de mutualiser davantage l'infrastructure et d'augmenter le taux d'utilisation des équipements (éviter le surdimensionnement) réduisant par conséquent l'impact environnemental. Au-delà des gains espérés dans la phase d'usage, le recours à des équipements génériques devrait permettre de réduire l'impact environnemental en rationalisant le processus de production et de gestion de fin de vie de ces équipements.

Cette innovation technologique est applicable aussi bien aux réseaux fixes que mobiles. Dans le cas particulier des réseaux mobiles, son application sur le réseau d'accès radio (la technologie de virtualisation est dénommée ainsi « vRAN : virtualized Radio Access Network ») d'autant plus pertinente que le réseau se densifie et qu'une architecture de type C-RAN est ainsi privilégiée (cf. ci-dessus).

Bien que la technologie soit bien établie chez les OTT/fournisseurs de services et gestionnaires de Cloud, il est difficile de quantifier de façon fiable le gain énergétique de la virtualisation et la logicialisation des réseaux au vu du manque de maturité de la technologie dans les déploiements réels à grande échelle chez les opérateurs. Ainsi, les perspectives intéressantes qu'offrirait théoriquement la virtualisation pour réduire l'impact environnemental, demeurent dépendantes de la capacité de maîtrise des outils supportant cette technologie : en effet en absence d'outils de gestion efficace plusieurs fonctionnalités virtualisées peuvent demeurer « inutilement » actives consommant ainsi de l'énergie; une gestion intelligente de la virtualisation devrait (via l'IA/ML par exemple) mettre en veille ces fonctionnalités virtualisées [13].

a) Cas d'application : Le « Slicing » dans les réseaux mobiles

Il s'agit de la technologie de découpage du réseau mobile en tranches telle que promue par la 5G c'est à dire la capacité de déployer virtuellement un réseau mobile personnalisé (répondant à des besoins particuliers en qualité de service). Le « Slicing » est mis en œuvre grâce à la virtualisation et la logicialisation des réseaux (cf. ci-dessus). En absence de « Slicing », les usagers (par ex. entreprises et verticaux) seraient potentiellement amenés à déployer des réseaux physiques dédiés ce qui interroge sur le bilan en matière d'impact environnemental – aussi bien en consommation de matière que d'énergie.

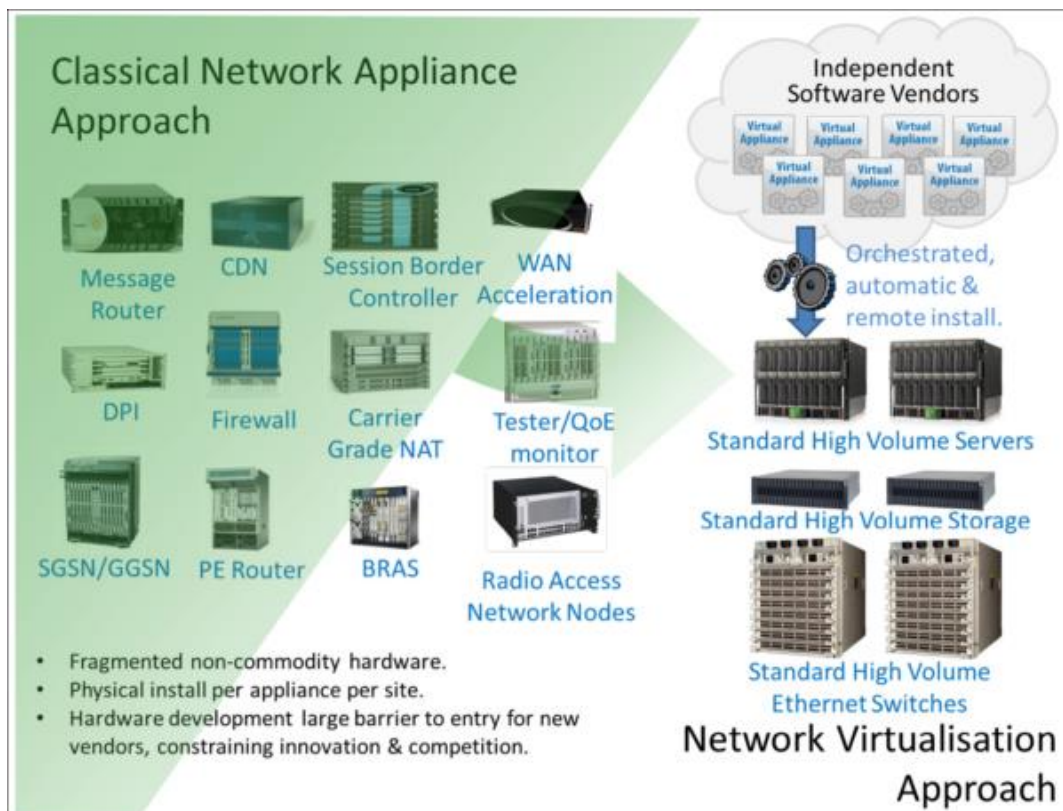


Figure 5 - Repenser les réseaux selon l'approche classique vs l'approche de virtualisation (source : ETSI NFV)

2.2.4 Autres leviers de réduction de la consommation énergétique : politique de routage, politique de redondance et performance des serveurs cache placés au sein d'un réseau

Le bilan environnemental des réseaux des opérateurs peut également être affecté par :

- **La politique de routage mise en place**, qui définit le « chemin » que doit parcourir un octet de donnée pour aller de l'utilisateur au contenu auquel il souhaite accéder. Un exemple de mauvaises pratiques consiste par exemple, pour un opérateur en France, à faire passer les requêtes des clients par les Etats-Unis pour leur permettre de consulter un contenu hébergé en France.
- **La politique de redondance**, qui consiste à dupliquer ou surdimensionner certaines parties du réseau (liens, équipements) pour assurer sa résilience en cas de problème, et engendre une plus forte consommation énergétique. Un équilibre est ainsi à trouver pour concilier résilience et réduction de la consommation.
- **Les performances énergétiques et l'emplacement des serveurs « cache »** (ou « Content Delivery Network » ou CDN), qui sont des serveurs hébergeant une copie des contenus fréquemment sollicités par les utilisateurs que les opérateurs disséminent dans leurs réseaux. Ils peuvent dans certains cas contribuer à réduire l'impact environnemental s'ils ont une bonne performance énergétique (exemple de la politique de placement des serveurs cache de Netflix [15]) ou si leur emplacement est optimisé (la requête d'un utilisateur pour accéder au contenu hébergé par ce serveur a alors moins de « chemin » à parcourir).

2.3 Cartographie des leviers et appréciation de leur complémentarité

Bien qu'une grande part d'incertitude entoure la quantification des différents leviers explicités ci-dessus au vu notamment de la complexité de l'exercice, la figure suivante illustre à travers une cartographie le positionnement des leviers en termes de difficulté de mise en œuvre/maturité technique du levier et d'impact potentiel sur le plan environnemental.

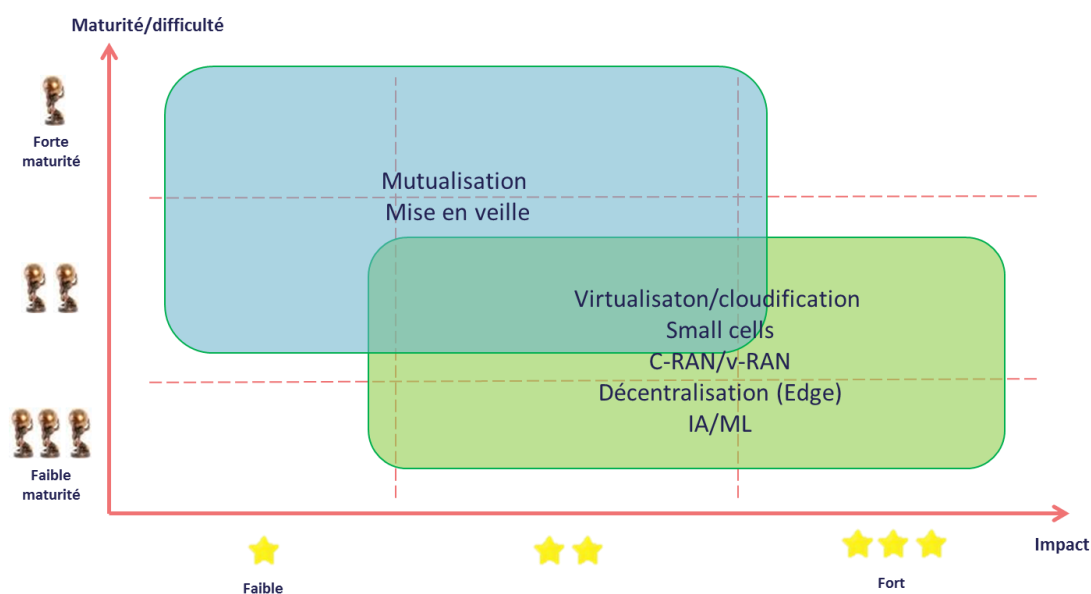


Figure 6 – Cartographie possible pour le positionnement des différents leviers en termes de maturité vs impact

Les différents leviers ne sont pas complètement isolés les uns par rapport aux autres ; bien souvent certains leviers sont implémentés conjointement afin de façonner plus efficacement l'architecture des réseaux. Le tableau ci-dessous explicite quelques exemples de l'adhérence/la complémentarité à laquelle on pourrait s'attendre entre les différents leviers :

Levier principal	Levier support	Adhérence/complémentarité
Virtualisation/ « cloudification »	IA/ML	Les techniques de l'IA/ML pourraient optimiser la gestion du cycle de vie des serveurs virtualisés et leur placement sur l'infrastructure physique sous-jacente.
	Mutualisation	Les perspectives de la mutualisation des équipements physiques sont plus étendues une fois les fonctionnalités qui opéraient par le passé sur des équipements dédiés sont désormais virtualisés.
	Mise en veille	En augmentant de taux de réutilisation de l'infrastructure physique, la virtualisation libère certains serveurs physiques qui peuvent être ainsi mis en veille voire éteints évitant ainsi le maintien de serveurs « zombies » [13].

Mise en veille	IA/ML	L'IA/ML permettrait d'anticiper plus efficacement les conditions de déclenchement de la mise en veille des équipements et d'optimiser les transitions entre les différents modes de veille tout en préservant la qualité de service du réseau.
Décentralisation (Edge Computing)	Virtualisation	Les fonctionnalités opérant sur les serveurs décentralisés pourraient être virtualisées évitant ainsi de surdimensionner les serveurs Edge.
	IA/ML	L'IA/ML pourrait être exploité afin d'optimiser l'architecture des serveurs Edge (par exemple sur l'emplacement des points de présence accueillant les serveurs Edge de l'opérateur, le dimensionnement des serveurs Edge et la gestion de leur interaction etc.).
	Mise en veille	Une fois les serveurs Edge correctement positionnés (en cohérence avec la répartition géographique du trafic), certains serveurs pourraient être mis en veille si le trafic est faible.
	Mutualisation	Quand l'emplacement des serveurs Edge de différents opérateurs coïncident (par exemple si les opérateurs ciblent la même poche de trafic), il serait potentiellement pertinent de les co-localiser voire de les mutualiser.
	Small cells	Small-cells et serveurs Edge pourraient être déployés conjointement : le cluster de small-cells captant localement le trafic le renvoie au Edge associé pour traitement. L'étude dans [9] par exemple estime le gain en consommation énergétique du Edge Computing associé aux small-cells à plus de 50% par rapport à un déploiement small-cells seul.
C-RAN	Edge Computing	Les serveurs Edge pourraient être co-localisés voire intégrés avec l'hôtel de BBU, ce qui permettra de traiter localement le trafic sans avoir besoin de remonter loin dans le réseau.
	IA/ML	Les techniques de l'IA/ML – implémentées au sein de l'hôtel de BBU - pourraient être exploitées pour optimiser dynamiquement la gestion des ressources radios entre les RRU du réseau C-RAN.
	Virtualisation	Certaines parties de l'architecture C-RAN, notamment les unités BBU centralisées dans l'hôtel BBU, pourraient être à terme virtualisées (vRAN).
	Mutualisation	Les hôtels de BBU de plusieurs opérateurs couvrant la même zone géographique pourraient être mutualisés.
Small cells	Mutualisation	Certains small-cells appartenant à différents opérateurs pourraient être mutualisés (pour éviter la multiplication des small-cells ou pour donner un accès partagé entre opérateurs sur un emplacement stratégique de la small-cell)
	Mise en veille	Grâce à un emplacement optimisé des small-cells, celles-ci peuvent être mises en veille en absence de trafic dans leurs zones de couverture.

	C-RAN/virtualisation	Plusieurs small-cells distribués sur la zone de couverture du site mobile « classique » pourraient être déployés selon une architecture C-RAN.
	IA/ML	Les techniques de l'IA/ML pourraient être exploitées à des fins de planification pour le placement optimal des small-cells et l'ingénierie de leurs sites radios, augmentant par conséquent leur efficacité comme le démontre le papier blanc [14].

3 Bibliographie

[1] : Dedryver *et al.* « Maitriser la consommation du numérique : le progrès technologique n’y suffira pas », Document de travail – France Stratégie, octobre 2020.

[2] : Chih-lin *et al.* “Energy efficient 5G for a greener future”, Nature Electronics, Vol. 3, avril 2020.

[3] : Vereecken *et al.* « Power Consumption in Telecommunication Networks: Overview and Reduction Strategies », IEEE Communications Magazine, juillet 2011

[4] : Masanet *et al.* “Reclibrating global data-center energy use estimates”, Science Magazine Vol. 367, Issue 6481, février 2020.

[5] : “GreenTouch Technical Solutions for Energy Efficient Mobile Networks”, GreenTouch FP7 project White paper, août 2015.

[6] : Ahvar *et al.* “Estimating Consumption of Cloud, Fog and Edge Computing Infrastructures”, IEEE Transactions on Sustainable Computing, mars 2019.

[7] : Lee *et al.* “The case for committing to greener telecom networks”, McKinsey White paper, février 2020

[8] : Basile Carle « Green 5G : Stratégies pour limiter la consommation énergétique de la 5G », IDATE, août 2020.

[9] : Yan *et al.* « Modeling the total energy consumption of mobile network services and applications », Energies 12/184, janvier 2019.

[10] : « Virtualisation des réseaux : architectures agiles », Réseau du Futur, Arcep, février 2019.

[11] : « Virtualisation des réseaux : focus sur les cas d’usage », Réseau du Futur, Arcep, 2020

[12] : « L’intelligence artificielle dans les réseaux de télécommunications », Réseau du Futur, janvier 2020.

[13] : Koomey J. et Taylor J. « Zombie/comatose servers redux », Koomey Analytics et Anthesis (2017)

[14] : « Precision Planning for 5G Era Networks with Small-cells », Small Cells Forum (SCF) & 5G America, White paper Document 230.10.01, octobre 2019.

[15] : « L’état d’Internet en France », Rapport d’activité, Arcep, Tome 3 - Edition 2020 (lien : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-etat-internet_edition-2020_250620.pdf).

[16] : «Energy Efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market », Final Study Report SMART 2018/0028, Commission européenne, 2020.