

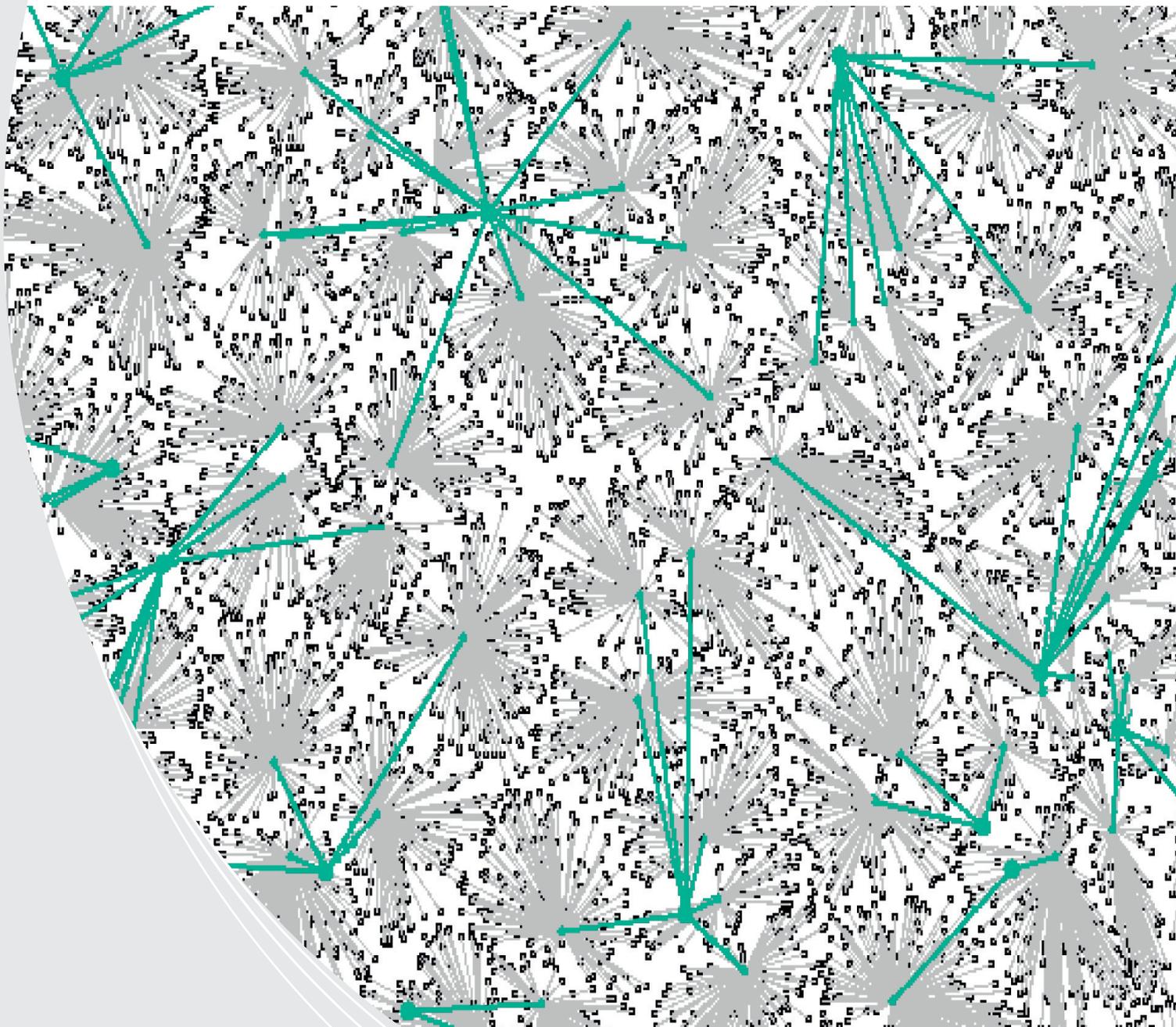


INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

RAPPORT SUR LA 5G ET LES RÉSEAUX DE COMMUNICATIONS MOBILES

Rapport de l'Académie des sciences – 12 juillet 2021

Groupe de travail de l'Académie des sciences sur les réseaux du futur



Sommaire

1. Résumé exécutif	p. 3
2. Recommandations	p. 6
3. Introduction	p. 7
3.1. Les innovations de la 5G	p. 7
3.2. Les nouveaux impacts	p. 8
3.3. Les interrogations liées à la 5G	p. 8
3.4. Plan de la suite du rapport	p. 9
3.5. Liste des questions	p. 10
4. Les réseaux de communications cellulaires	p. 11
4.1. L'accès radio	p. 12
4.2. La structure du réseau	p. 13
4.3. Le rôle normatif du 3GPP	p. 14
4.4. Quelques autres types de réseaux des communications mobiles	p. 14
5. Réponses aux 9 questions	p. 16
5.1. Question 1 : Pourquoi de nouvelles générations ?	p. 16
5.1.1. Les besoins	p. 16
5.1.2. Craintes du public et autres objections liées à la question 1	p. 17
5.2. Question 2 : bases scientifiques et transformations technologiques	p. 18
5.2.1. Les bases scientifiques de la 5G et autres réseaux du futur	p. 18
5.2.2. La focalisation des ondes	p. 20
5.2.3. L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences	p. 22
5.2.4. Le passage massif au logiciel	p. 22
5.2.5. Craintes du public et autres objections liées à la question 2	p. 24
5.3. Question 3 : les effets sur l'économie et les activités humaines	p. 24
5.3.1. Les hypothèses économiques	p. 24
5.3.2. Apports probables bien identifiés	p. 25
5.3.3. Perspectives pour les transports	p. 27
5.3.4. Pertinence des perspectives	p. 27
5.3.5. Des objets connectés à l'Internet des objets	p. 28
5.3.6. Apports envisagés à plus long terme	p. 28
5.3.7. Craintes du public et autres objections liées à la question 3	p. 29
5.4. Question 4 : Vers la 6G ?	p. 30
5.4.1. Les apports prévus de la 6G	p. 30
5.4.2. Les investissements dans le monde	p. 31
5.4.3. Craintes du public et autres objections liées à la question 4	p. 31
5.5. Question 5 : la situation industrielle et académique	p. 32
5.5.1. Les acteurs mondiaux	p. 32
5.5.2. Les acteurs européens	p. 32
5.5.3. La situation française	p. 33
5.5.4. Les autres réseaux sans fil	p. 33
5.5.5. Craintes liées à la question 5	p. 33
5.6. Question 6 : les ressorts institutionnels	p. 34

5.6.1. Les normes mondiales	p. 34
5.6.2. L'alliance O-RAN	p. 34
5.6.3. Les programmes de recherche	p. 35
5.6.4. Craintes liées à la question 6	p. 35
5.7. Question 7 : l'impact sur l'environnement	p. 35
5.7.1. La part du numérique dans la consommation énergétique	p. 35
5.7.2. La consommation énergétique de la 5G	p. 36
5.7.3. Craintes du public et autres objections liées à la question 7	p. 39
5.8. Question 8 : les impacts des réseaux sur la santé	p. 40
5.8.1. Les deux impacts potentiels	p. 40
5.8.2. L'impact des ondes sur la santé	p. 40
5.8.3. Craintes du public liées à la question 8	p. 42
5.9. Question 9 : les enjeux de souveraineté	p. 43
5.9.1. Les communications cellulaires sont stratégiques	p. 43
5.9.2. La sécurité informatique	p. 43
5.9.3. La souveraineté	p. 45
5.9.4. Le besoin d'une stratégie française et européenne	p. 46
5.9.5. Craintes du public et autres objections liées à la question 9	p. 46
Remerciements	p. 48
Bibliographie	p. 49
Annexes	p. 52
Composition du groupe de travail	p. 52
Liste des personnalités auditionnées	p. 53

1. Résumé exécutif

Les réseaux de communications mobiles sont devenus en quelques décennies une composante majeure du développement des technologies de l'information au niveau mondial. En particulier, les réseaux cellulaires ont complètement transformé la notion de connectivité ainsi que nos modes de communications. Le développement de ces réseaux s'appuie sur un rythme d'innovation scientifique et technologique rapide organisé en générations. À la 2G lancée en 1991 a succédé le réseau 3G dès 2001, lui-même remplacé par la 4G en 2010 pour assurer les télécommunications mobiles et l'accès aux ressources d'Internet. Leur impact économique et social est considérable. Les réseaux locaux fondés sur le WiFi ou Bluetooth ainsi que les réseaux à bas débit et basse consommation sont d'autres types de réseaux sans fil autorisant la mobilité, qui jouent un rôle économique majeur. Les réseaux ou constellations de satellites en orbite basse en cours de déploiement vont bientôt offrir un troisième type d'accès mobile permettant la couverture des régions isolées.

La 5G a plusieurs objectifs, dont les plus importants sont de résoudre les problèmes de saturation de la 4G en zone urbaine et de permettre la transition numérique de l'industrie et des services. Elle s'appuie sur plusieurs avancées majeures qui permettent d'améliorer la connectivité et la fiabilité, d'augmenter les débits des transferts d'information et de réduire le temps de latence (le délai de transmission des données) à une valeur de l'ordre de la milliseconde. Alors que les générations successives avaient été favorablement accueillies par le public, l'introduction de la 5G soulève des réactions négatives et des critiques qui conduisent à une remise en question du bien-fondé du déploiement de ces nouveaux réseaux, et dans certains cas, à une demande de désengagement de la France dans ce domaine. Nous abordons également ces critiques ici.

Ce rapport propose d'abord une synthèse des avancées scientifiques et technologiques sur lesquelles les nouvelles générations de réseaux cellulaires s'appuient dans tout un ensemble de domaines : accès radio, définition par logiciel, virtualisation, informatique en périphérie, etc. Il étudie ensuite les champs de possibilités ouverts par ces générations, leurs utilisations envisagées dans plusieurs domaines économiques, ainsi que leur potentiel en termes de création de valeur et d'augmentation de la compétitivité des entreprises. Certaines de ces utilisations sont déjà bien identifiées voire engagées, notamment dans le domaine de la productique et celui des transports. D'autres concernent le plus long terme, notamment le développement d'une nouvelle informatique multi-accès en périphérie de réseau, qui pourrait conduire, dans l'avenir, à tout un ensemble de nouveaux services. Le rapport aborde aussi l'évolution des autres réseaux mobiles non cellulaires, quoique de manière moins détaillée.

Ces sujets sont traités par le biais de neuf questions qui sont pour la plupart accompagnées par l'analyse des craintes et des inquiétudes les plus fréquemment citées en liaison avec la question. L'éclairage scientifique qui est à la base du rapport est utilisé pour tenter de distinguer les objets des craintes qui sont clairement justifiés de ceux qui le sont moins, ou encore de ceux pour lesquels les connaissances actuelles sont insuffisantes pour porter un jugement.

Une des questions souvent posées est celle de la nécessité du remplacement de la 4G par la 5G

au-delà de l'amélioration des débits des communications. Il apparaît que la première motivation de la 5G est de traiter la saturation des réseaux 4G dont l'utilisation croît rapidement. Il s'agit donc pour les opérateurs de s'adapter aux nouveaux usages et à la croissance du trafic. L'alternative souvent évoquée d'une simple densification de la 4G n'est pas une bonne solution car elle aurait à terme un rendement décroissant du fait des interférences entre antennes trop proches, tout en conduisant à une consommation énergétique supérieure. L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences et la mise en œuvre de techniques de focalisation permettent à la 5G d'éviter cet écueil en consommant beaucoup moins d'énergie pour un service donné. Mais c'est surtout par l'amélioration conjointe de la latence et de la capacité du réseau et par la mise en œuvre de la virtualisation que les apports de la 5G seront à terme les plus notables. Leur impact potentiel concerne en effet un vaste ensemble de secteurs de l'économie dans l'industrie, les services et les transports.

Une crainte fréquemment citée est celle de l'impact environnemental du déploiement et de l'exploitation des nouvelles générations de réseaux. Le bilan sur cette question est complexe, avec des éléments à charge, comme le coût environnemental du renouvellement des terminaux, et des éléments positifs comme l'utilisation de techniques de focalisation des ondes par la 5G qui permettent de dépenser moins d'énergie pour un débit donné. Cette crainte est souvent renforcée par celle de l'effet rebond, selon laquelle la présence de capacités plus élevées conduirait inéluctablement à une croissance des usages et par exemple à une augmentation inconsidérée de l'usage de la vidéo à la demande. Les éléments à charge sont évalués dans le rapport. Il y est indiqué que l'effet rebond pourrait être contrebalancé par une politique d'éducation du public et par des tarifications adaptées. Toutefois, le point central pour cette question de l'impact environnemental est de nouveau l'impact potentiel sur les processus industriels ou organisationnels et sur les transports. Leur optimisation en temps réel ouvre des perspectives d'économies d'énergie induites, encore peu étudiées mais qui pourraient faire de ces réseaux des outils clés pour réduire la dépense en énergie dans tous ces secteurs de l'économie.

Une autre inquiétude déjà soulevée pour les générations de réseaux précédentes concerne l'impact des ondes électromagnétiques sur la santé. En ce qui concerne la 5G, le rapport n'a rien à ajouter ou retrancher au tout récent avis de l'Anses sur le même sujet : il est peu probable que le déploiement de la 5G dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz constitue à l'heure actuelle de nouveaux risques pour la santé. Il est en revanche impératif que l'utilisation des ondes millimétriques qui est prévue pour le futur dans le contexte des applications industrielles ainsi que pour les *smartphones* grand public soit précédée d'études approfondies. De manière plus générale, des recherches complémentaires sont nécessaires sur les points pour lesquels la communauté scientifique n'a pas le recul suffisant.

Les craintes liées à la résilience et à la cybersécurité d'une part et au renforcement potentiel de la surveillance de masse d'autre part sont particulièrement légitimes au vu de la situation actuelle sur ces questions. Par exemple, l'ambition de la 5G de jouer un rôle central dans le contrôle de systèmes critiques n'a de sens que si la résilience et la sécurité de ces réseaux sont garanties. Ces questions ne sont pas simples (voir l'encadré) et leur difficulté semble être encore sous-estimée par le public et par les industriels du domaine. Ce sujet stratégique mérite d'être traité en profondeur sur le plan scientifique et en termes pratiques. En ce qui concerne la surveillance des individus au moyen des réseaux de communications à des fins mercantiles, elle est hélas déjà une réalité connue de tous dans le contexte des plateformes numériques mises

en œuvre par les GAFAM. La combinaison de l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA), de l'amélioration de la géolocalisation des terminaux et des capacités d'interaction temps réel de la 5G pourrait ouvrir des perspectives nouvelles à ce type de surveillance, dont on peut aisément imaginer les dérives potentielles si elles ne sont pas encadrées par des réglementations adaptées.

Les craintes et les objections décrites plus haut et celles qui sont passées en revue dans ce rapport, devraient être mises en regard des perspectives que la 5G peut ouvrir dans l'amélioration des communications mobiles utilisées de plus en plus dans la vie quotidienne des personnes ou dans celle des acteurs économiques. Pour ces derniers, la 5G devrait contribuer au développement de leur productivité et de leur compétitivité, qui sont des enjeux majeurs dans le monde actuel. Ce serait donc à notre sens une grave erreur que de laisser la maîtrise et l'orientation future de ces réseaux au reste du monde. Qu'il s'agisse de bénéfices sociétaux, industriels, économiques, ou de risques, mieux vaut se mettre en mesure de profiter des premiers et de comprendre les seconds pour mieux les circonscrire.

2. Recommandations

1. Agir de manière déterminée pour informer l'opinion publique, les médias, les responsables politiques et les pouvoirs publics y compris régionaux des enjeux réels des réseaux mobiles ; faire prendre conscience de l'importance décisive de ces réseaux dans le futur pour l'industrie et les services.
2. Alerter sur les risques de décrochage économique et de perte de souveraineté si on ne consacre pas l'attention et les ressources nécessaires au domaine.
3. Élever la R&D et la recherche scientifique sur les réseaux de communications au sens large au rang d'une priorité nationale et européenne en couvrant dès maintenant et sur le long terme l'ensemble des domaines nécessaires à la conception et à la maîtrise de ces réseaux, comme c'est actuellement fait aux États-Unis ou en Asie.
4. Réintroduire la recherche scientifique sur ces sujets dans les programmes de l'ANR et de la Commission européenne. Se doter d'une entité scientifique indépendante capable d'évaluer et de suivre les effets direct et indirects des réseaux de communications dans tous les domaines (énergie, santé publique, économie, etc.).
5. Renforcer les formations sur ces sujets dans les universités et grandes écoles.
6. Consacrer un effort majeur aux domaines cruciaux que sont la sécurité informatique, la résilience des réseaux et la maîtrise de l'informatique en cœur et en périphérie de réseau.
7. Soutenir les entreprises européennes des télécommunications dans leurs développements et dans leur création de valeur, notamment en les protégeant de toute forme de concurrence déséquilibrée. Renforcer leur écosystème en rétablissant l'ensemble de la chaîne de valeur, en favorisant la coopération entre le monde académique et celui des start-ups et des entreprises.
8. Soutenir l'action des agences gouvernementales qui ont la charge de ces questions : la Cnil pour la protection de la vie privée, l'Arcep pour la fracture numérique territoriale et l'Anssi pour les aspects de sécurité et d'homologation des matériels.
9. Déployer un plan de recherche et d'action sur les risques associés aux réseaux cellulaires, les effets potentiels des rayonnements sur la santé et les effets des abus des technologies numériques sur l'équilibre personnel.
10. Promouvoir les bonnes pratiques par des études d'impact des réseaux cellulaires en matière de dépense énergétique, d'empreinte carbone et d'utilisation des ressources, ainsi que des études visant à quantifier et favoriser les réductions des dépenses énergétiques et les avantages environnementaux que la 5G permettra dans d'autres secteurs d'activité.
11. Encourager un dialogue impartial et informé sur les craintes, les inquiétudes et les dangers liés au déploiement de ces réseaux, ainsi que sur leurs apports. Approfondir la réflexion sur les mesures susceptibles de protéger les valeurs démocratiques et la vie privée contre les menaces que le développement des réseaux de communications pourrait induire ou amplifier.
12. Mobiliser les ressources de l'enseignement scolaire et de l'information du public en matière d'informatique, de technologies numériques et de communications, condition indispensable pour développer les bonnes pratiques et ramener à de justes proportions la perception des risques encourus.

3. Introduction

Ce rapport a pour but de discuter, sur un plan essentiellement scientifique et technique, de l'évolution actuelle et future des réseaux de communications mobiles et tout particulièrement des réseaux cellulaires. Il traite principalement de la transition actuelle vers la 5G et plus brièvement des plans pour ce qui s'appelle encore de façon informelle la 6G, tout en n'ignorant pas les questions que se posent de nombreux commentateurs. Il traite aussi de manière plus succincte des technologies en compétition ou interaction avec ces nouvelles générations de réseaux cellulaires, notamment les réseaux de satellites en orbite basse, les nouvelles générations de WiFi, ou encore les réseaux d'objets interconnectés à bas débit et basse consommation. En France, c'est cependant le réseau à base de fibre optique qui, combiné avec les réseaux locaux sans fil de type WiFi, devrait continuer à transporter une partie dominante du trafic, alors que les réseaux cellulaires seront surtout consacrés à la mobilité, à la desserte de zones reculées qu'il ne serait pas rentable de fibrer, aux applications professionnelles et industrielles et à l'interconnexion des objets.

À la suite des premiers développements de réseaux de téléphonie mobile, les réseaux cellulaires numériques modernes sont apparus avec la 2G (GSM) en 1991, puis la 3G (UMTS) en 2001 et la 4G en 2010, en suivant un cycle de l'ordre de 10 ans. Chacune de ces générations a apporté des innovations considérables, tant quantitativement que qualitativement. Elles ont été rapidement adoptées par les populations dans le monde entier : chaque génération a apporté une multiplication par 10 du débit, une forte diminution de l'énergie nécessaire pour transporter un message et une expansion géographique continue. Une nouveauté fondamentale de la 4G a été l'unification des communications mobiles et de l'accès à Internet, rendue possible par l'utilisation d'IP (*Internet Protocol*), puis par l'introduction en 2008 de l'iPhone, qui a été rapidement suivie par l'explosion de l'industrie des smartphones. Ces derniers sont devenus les objets techniques les plus vendus et les plus utilisés au monde. Un point crucial est que la partie récente de cette évolution a été gouvernée par des normes mondiales définies par divers organismes de normalisation dont le 3GPP (*3rd Generation Partnership Program*), organisation internationale réunissant avec succès les industriels et chercheurs du domaine. Cela a rendu tous les appareils interopérables dans tous les pays. À noter aussi que le nombre de brevets associés à une génération est de l'ordre du millier.

En cours d'introduction mondiale par les opérateurs à la suite de sa normalisation par le 3GPP, la 5G suit le même chemin que les générations précédentes. Elle conduit une fois encore à une multiplication par 10 des débits par rapport à la 4G et à une efficacité énergétique bien supérieure. La 5G se distingue en offrant pour la première fois des latences très courtes permettant de traiter tout un ensemble d'applications temps-réel qui ne pouvaient être envisagées dans le cadre des générations précédentes, par exemple dans l'industrie, les transports et les services.

3.1. Les innovations de la 5G

Tout ceci s'appuie sur des innovations majeures. D'abord en physique et théorie des communications, avec le développement de nouvelles méthodes de focalisation des ondes

électromagnétiques et l'utilisation de fréquences plus élevées pour augmenter les capacités. Puis en mathématiques, avec des avancées dans la théorie des grands graphes aléatoires, les progrès de la théorie de l'information qui conduisent à des techniques de transmission adaptées à ces méthodes de focalisation, ainsi que les progrès sur l'optimisation et le partage des ressources. Également en électronique, avec des circuits de plus en plus performants et de moins en moins énergivores dans les cœurs de réseaux, les stations de base, les terminaux mobiles ou les objets connectés. À un étage supérieur, dans l'architecture des réseaux avec des transformations majeures, dans l'organisation des cellules, dans celle du réseau de collecte (*backhaul*) qui connecte les stations de base à l'Internet, dans la répartition des fonctionnalités entre le cœur et la périphérie du réseau, et surtout dans le fait que les éléments d'architecture sont désormais définis comme des fonctions logicielles du réseau bien plus riches que dans les générations précédentes, que l'on peut adapter de manière souple aux services délivrés (*Service Based Architectures*). Cela permet par exemple de construire facilement des réseaux virtuels étanches au-dessus d'un même réseau physique, ou encore de faciliter la composition de services existants pour en produire de nouveaux, ce qui était impossible auparavant. C'est la conjonction de toutes ces innovations qui permet le respect des contraintes temporelles pour l'acheminement des messages.

3.2. Les nouveaux impacts

La nouveauté principale par rapport aux générations précédentes est que les innovations de la 5G concerneront bien sûr les communications personnelles, mais surtout l'industrie, les services, les usines, les transports, les villes intelligentes, les aéroports, les gares, les hôpitaux, etc. Ces innovations pourraient modifier en profondeur l'organisation de ces secteurs professionnels, par exemple en supprimant les kilomètres de câbles de communications qui relient les robots dans les usines afin de simplifier leur adaptation à de nouvelles productions et leur maintenance, en permettant un contrôle de qualité en temps réel de la production, en améliorant la fluidité des transports automobiles et collectifs tout en diminuant les risques d'accidents, ou encore en établissant de façon beaucoup plus souple de grands réseaux de capteurs et d'actionneurs dans les villes pour surveiller la pollution et détecter rapidement divers types d'alertes. Toutefois, les usages professionnels, notamment dans l'industrie et les services, ne se développeront que progressivement. À court terme, en France, la 5G servira principalement à désengorger les communications cellulaires dans les zones denses. Dans un premier temps, une partie importante du trafic sera comme pour la 4G, la vidéo en haute définition et les jeux en réseaux, ou encore les outils de télétravail.

3.3. Les interrogations liées à la 5G

Socialement, les générations précédentes ont été assez bien acceptées par les populations, quoique peut-être plus difficilement en France que dans d'autres pays : la 2G y a été un peu boudée à son démarrage car jugée intrusive dans la vie de tous les jours. La généralisation de l'utilisation des communications sans fil a aussi posé la question de l'impact des ondes électromagnétiques sur la santé et, plus récemment, celle des effets potentiellement délétères de la surexposition aux écrans des enfants (surexposition qui ne se limite d'ailleurs pas aux seuls *smartphones*). On voit en ce moment que la 5G amplifie ces interrogations, tout en

ajoutant de nouvelles craintes comme celle de l'augmentation de la consommation énergétique induite par cette nouvelle génération d'équipements et de terminaux mobiles, ou celle de la surveillance généralisée des individus par les entreprises ou les États. Ces interrogations légitimes sont discutées dans la société, étudiées par des associations, dans des travaux parlementaires, par des municipalités (voir par exemple [5N21]) et dans divers rapports comme ceux du Haut Conseil pour le Climat, de l'Agence de la transition écologique (Ademe) et de l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep). Elles ne sont pas propres à la France : selon l'Usine Nouvelle (2 mars 2021) les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie seraient en tête des pays les plus sceptiques vis-à-vis du développement de la 5G.

3.4. Plan de la suite du rapport

Nous commençons par une description des bases scientifiques, technologiques et économiques qui sous-tendent ces évolutions. Cette description a été rédigée pour être accessible à toute personne un peu familière avec les sciences. Nous analysons aussi les interrogations et proposons des éléments de réponse fondés sur les bases en question. Le rapport ne se limite pas aux seules questions débattues dans le public actuellement, qui concernent principalement les usages non professionnels (voix, accès à l'Internet). Les questions examinées concernent aussi la chaîne de valeur du domaine des réseaux cellulaires dans son ensemble. Cette chaîne de valeur inclut entre autres les fabricants de composants électroniques (par exemple Intel), les équipementiers de télécommunications (par exemple Nokia), les opérateurs de télécommunications (par exemple Free) et les fournisseurs de services (par exemple Google). Elles concernent aussi les applications professionnelles de ces réseaux dans l'industrie, les transports, la santé et les services. Nous consacrons une partie importante à ces applications dans ce rapport, à la mesure de leur rôle économique et stratégique pour le futur. Nous examinons également d'autres questions stratégiques, comme la position de l'Europe et de la France dans le monde des télécommunications modernes. La 2G a été conçue en Europe avec une action centrale de la France et la création d'industries concernant à la fois les réseaux et les terminaux mobiles. L'Europe et la France ont été moins présentes pour la 3G et la 4G, même si une innovation scientifique centrale pour les réseaux a été l'introduction des turbocodes (invention française qui a permis aux communications de s'approcher de la capacité limite des canaux de transmission). Sur le plan industriel, pratiquement aucun smartphone 4G n'a été conçu et construit en Europe. Pour la 5G proprement dite, même si quelques sociétés françaises jouent un rôle important, la France ne joue plus un rôle majeur. Fort heureusement, il reste en Europe deux concepteurs et constructeurs de réseaux mobiles, Ericsson et Nokia, et quelques opérateurs de stature internationale (dont Orange en France), ainsi que des constructeurs de solutions techniques pour les réseaux sans fil dans l'industrie ; mais il n'y a plus aucune possibilité de construire un smartphone en Europe, et la recherche dans le domaine des télécommunications est bien plus réduite qu'en Chine ou aux États-Unis. Ces questions géostratégiques font donc aussi partie de nos interrogations.

Le rapport est organisé en 9 questions. Pour chacune de ces questions, nous donnons d'abord des réponses factuelles s'appuyant sur les connaissances des membres du groupe de travail et les échanges avec des experts compétents du domaine. Les questions posées exigent en effet des apports de domaines très différents, par exemple en économie, en biologie ou encore en

sciences environnementales, en sciences sociales et politiques ou encore dans le domaine juridique. Puis nous passons en revue les craintes du public en relation avec la question, dans le but de distinguer celles qui sont peu justifiées de celles qui le sont clairement, ou encore celles sur lesquelles il y a incertitude et qui demandent des études complémentaires.

3.5. Liste des questions

Question 1 : Quelles sont les raisons qui conduisent les acteurs du domaine à juger utile ou nécessaire de développer/déployer de nouvelles générations de réseaux cellulaires ?

Question 2 : Quelles sont les bases scientifiques et les transformations technologiques qui sous-tendent la cinquième génération de réseaux cellulaires (5G) ?

Question 3 : Quels sont les effets prévisibles ou probables du déploiement de ces nouvelles générations de réseaux sur l'économie et la société ? Quels sont les domaines dans lesquels elles vont avoir des apports qualitatifs non atteignables par les générations précédentes ?

Question 4 : Peut-on anticiper ce que sera la 6G ? Y a-t-il de la recherche en France et en Europe sur ces questions ?

Question 5 : Quelle est la situation industrielle et académique dans ce domaine au niveau français, européen et mondial ? Sur le plan scientifique et industriel, quelles sont nos forces et quels sont nos investissements actuels dans ces domaines ?

Question 6 : Quels sont les ressorts institutionnels actuels de l'innovation dans ces domaines (programmes incitatifs, agences de financement de la recherche, agences de normalisation) ?

Question 7 : Quel est l'impact prévisible de ces réseaux sur l'environnement, notamment la consommation énergétique ?

Question 8 : Quel est l'état des connaissances sur les effets de ces réseaux sur la santé ?

Question 9 : Quels sont les enjeux de souveraineté française ou européenne ? Quelles sont les questions de sécurité spécifiques liées aux dépendances envers les équipements et logiciels des nouvelles générations de réseaux cellulaires ?

4. Les réseaux de communications cellulaires

Avant de répondre aux neuf questions ci-dessus, nous décrivons brièvement les principes d'organisation des réseaux cellulaires, ainsi que le cadre institutionnel qui distingue ces réseaux des autres réseaux de communications hertziens.

Terminologie des réseaux cellulaires

Fréquences : les fréquences d'ondes utilisées sont exprimées en Hertz, en abrégé Hz, et plus particulièrement par ses multiples de 1000 en 1000 : kilohertz (kHz), Mégahertz (MHz), Gigahertz (GHz) et Téraherz (THz).

Bandes de fréquences : la communication se fait en variant la fréquence d'une onde entre deux limites qui déterminent une bande de fréquence. Pour la 5G en France, les bandes de fréquences utilisées sont celle autour des 3,5 GHz et celle autour des 700 MHz. Dans le futur, la 5G utilisera aussi les ondes millimétriques, dans la bande autour des 26 GHz. La 6G prévoit d'utiliser de nouvelles bandes de fréquences allant de 100 GHz à 3 THz.

Propagation et réflexion des ondes électromagnétiques : lors d'une transmission radio, l'énergie contenue dans le signal électromagnétique capté par l'antenne de réception dépend de l'énergie émise par l'antenne d'émission et de la distance entre l'émetteur et le récepteur ainsi que des obstacles existant sur le parcours des ondes. Dans certains milieux, il y a plusieurs parcours pour les ondes émises à cause de réflexions. Dans ce cas, l'énergie reçue dépend aussi de la géométrie des réflexions. On parle de milieu complexe lorsque le nombre des parcours différents est grand. Dans ce cas, les signaux peuvent s'additionner de manière constructive ou destructive de façon imprévisible.

Cellule : domaine géographique couvert par une station de base. Si les terminaux se raccordent à la station de base avec le meilleur signal en moyenne, on obtient, en l'absence d'obstacles, une géométrie simple pour les cellules (en termes mathématiques, cellules de Voronoï des stations de base dans le cas où les puissances d'émission sont toutes égales).

Station de base : élément de réseau qui comporte un ensemble d'antennes, généralement situées sur un pylône. La station de base connecte les terminaux de la cellule au réseau filaire.

Terminal mobile : un émetteur / récepteur mobile côté utilisateur, par exemple un smartphone ou un objet connecté.

Voies descendantes et montantes : la voie descendante est celle des transmissions de la station de base au terminal, la voie montante celle du terminal à la station de base.

Capacité : la théorie de l'information de Shannon permet de déterminer le débit maximal qui peut être obtenu sur un canal de communications (en nombre de bits par seconde). C'est ce qu'on appelle la capacité de Shannon du canal. Dans le cas le plus simple (bruit

additif gaussien) cette capacité est déterminée par le rapport signal sur bruit. Par exemple, sur la voie descendante d'un réseau cellulaire où l'interférence est traitée comme du bruit, ce rapport a pour numérateur la puissance du signal reçu de sa station de base par le terminal. Le dénominateur est la somme de la puissance du bruit thermique et des puissances reçues des stations de base autres que celle qui sert le terminal, qui sont considérées comme du bruit.

Débit de crête et débit effectif : on caractérise souvent un réseau par son débit de crête, qui est celui qu'obtiendrait en moyenne un utilisateur typique de ce réseau en l'absence d'autres utilisateurs dans sa cellule. Ce débit de crête est au mieux la capacité du canal de l'utilisateur. Dans le cas le plus simple (absence d'interférences intracellulaires et ordonnancement égalitaire des utilisateurs), le débit effectif moyen sur la voie descendante est égal au débit de crête sur cette voie, divisé par le nombre d'utilisateurs dans la cellule. Les débits effectifs ressentis par les utilisateurs peuvent donc être très inférieurs au débit de crête en cas de forte charge. L'utilisation trop fréquente du seul débit de crête dans les publicités risque de donner de faux espoirs aux utilisateurs, concernés eux par le débit effectif : un réseau peut avoir un excellent débit de crête mais de mauvais débits effectifs s'il est très chargé.

Latence : délai entre l'envoi d'un message par la station de base et l'utilisateur. C'est une propriété locale, à ne pas confondre avec le délai de transmission de bout en bout dans une communication.

4.1. L'accès radio

Un réseau cellulaire organise la couverture d'un territoire en installant des stations de base (comportant des antennes) dont les zones de desserte se chevauchent et qui communiquent d'une part avec les mobiles proches par des canaux hertziens et d'autre part avec une infrastructure fixe interconnectant les stations de base, le cœur de réseau et l'Internet, qu'on appelle le réseau de collecte. Le réseau cellulaire est constitué de l'ensemble de tous les éléments cités (le cœur de réseau, le réseau de collecte, les stations de base, les terminaux mobiles et les objets connectés), en incluant l'ensemble des matériels et logiciels permettant le fonctionnement du système de communications et des services qu'il rend possibles.

La spécificité de cette architecture de communications est l'accès radio, qui utilise la propagation des ondes électromagnétiques pour transmettre de la station de base au mobile (voie descendante) et dans l'autre sens du mobile à la station de base (voie montante).

La transmission est réalisée en modulant les signaux électromagnétiques envoyés. La quantité d'information qui peut être envoyée dépend de l'énergie du signal électromagnétique captée par le récepteur, signal qui est converti en courant électrique et dont on extrait l'information. En pratique, sur la voie descendante, le signal utile est pollué par les interférences dues aux signaux émis par les autres stations de base et par le bruit électronique existant dans les circuits de réception. Plus l'énergie du signal utile est élevée, relativement à celle des interférences et du bruit, plus la capacité du canal (débit d'information potentiel) sera grande. Il en va de même pour les signaux de la voie montante.

Dans un réseau cellulaire, on rattache usuellement le mobile à la station qui lui procure en moyenne la meilleure puissance de signal (énergie reçue par unité de temps), typiquement la plus proche en l'absence d'obstacles quand les stations ont la même puissance d'émission. Pour un utilisateur donné, ceci définit la puissance reçue par le mobile sur la voie descendante et par la station de base sur la voie montante. Sur la voie descendante, dans le cas le plus simple (sans obstruction), l'interférence est due aux signaux reçus provenant des autres stations de base, alors que sur la voie montante, l'interférence est due à l'ensemble des mobiles. Cette architecture cellulaire pour l'accès radio a l'avantage de donner une bonne puissance de signal (station la plus proche) et une interférence contrôlée, du moins sur la voie descendante (l'interférence venant des stations lointaines). Nous verrons dans la question 2 quelles sont les innovations les plus importantes pour l'accès radio, notamment les méthodes de focalisation.

4.2. La structure du réseau

Les stations de base sont interconnectées au cœur de réseau et à l'Internet par le réseau de collecte. L'interconnexion des stations proches est utilisée pour leur coopération. Le réseau de collecte transporte quant à lui les flux d'informations entre les stations de base et le cœur de réseau. Cette architecture est en pleine transformation dans la 5G, avec notamment le déploiement de ressources de calcul et de stockage dans les stations de base dans le but de permettre le développement de l'informatique en périphérie du réseau (cf. Questions 2 et 3), ce qui a des implications importantes sur les fonctionnalités de ces réseaux et leur opération.

L'opération du réseau est fondée sur divers outils issus de la théorie du contrôle, de la recherche opérationnelle ou encore de la théorie des files d'attente, qui permettent de concevoir des algorithmes efficaces pour l'ordonnancement des flux d'information, le partage des ressources radio, le contrôle de la puissance d'émission, ou encore la réutilisation spatiale des fréquences. Ces algorithmes ont pour fonction de partager cette capacité globale de transmission entre les utilisateurs présents à un moment donné dans le réseau, de manière à maximiser une certaine grandeur collective, par exemple la somme des débits. Par exemple, pour réaliser le partage dynamique des ressources radio entre les utilisateurs, les réseaux cellulaires actuels mettent en œuvre toute une variété de techniques d'accès aux ressources radio par l'ensemble des utilisateurs, telles que l'accès multiple par répartition temporelle (TDMA), l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) ou l'accès multiple par répartition par code (CDMA).

Le logiciel du réseau a pour fonction de permettre à l'ensemble de tous ces constituants d'interagir de manière souple et efficace et de garantir que les services en cours d'exécution à tout moment dans le réseau sont réalisés avec le niveau de qualité attendu en termes de fiabilité, débit et latence, par exemple. Les innovations de la 5G dans le domaine du logiciel sont majeures, avec notamment la virtualisation décrite dans les réponses à la question 2.

Mathématiquement parlant, un réseau cellulaire, avec tous les constituants que nous venons de décrire, est un très grand graphe sur lequel se déroulent de nombreux processus en interaction. On sait depuis une dizaine d'années intégrer tous ces constituants dans des modèles probabilistes qui permettent de représenter le système dans sa globalité et de calculer des statistiques d'ensemble comme la probabilité de couverture ou l'efficacité spectrale (capacité de Shannon par Hertz - voir encadré) de l'utilisateur typique pour une architecture cellulaire donnée. Ces outils permettent au concepteur ou à l'opérateur du réseau de le dimensionner

pour une qualité de service prédéfinie. Ces méthodes de dimensionnement ont déjà été utilisées pour la 4G et sont en cours d'adaptation aux spécificités de la 5G.

4.3. Le rôle du 3GPP dans la normalisation

L'évolution des réseaux de communications cellulaires est actuellement déterminée par un organisme international de normalisation appelé 3GPP (3rd Generation Partnership Project), dont les normes sont universellement utilisées par les opérateurs ayant acquis des licences pour les bandes de fréquences propres à ces réseaux. Le 3GPP, qui avait déjà défini les normes des générations précédentes de réseaux cellulaires, travaille actuellement à la poursuite de la définition de celles de la 5G. Les principaux contributeurs des organismes de normalisation sont les équipementiers du domaine des télécommunications, les grands opérateurs et les scientifiques. Un principe général et essentiel est celui de la compatibilité ascendante : les équipements des réseaux de nouvelle génération doivent pouvoir interagir avec ceux des générations antérieures. Le déploiement de la 5G n'en est qu'à ses débuts en France, en complément de la 4G et de générations précédentes, mais sans les remplacer dans un futur proche. En particulier, l'utilisation des fréquences millimétriques n'est pas prévue en France avant quelques années (cf. Question 2).

D'autres organismes importants de normalisation sans fil seront décrits dans la question 6.

4.4. Quelques autres types de réseaux des communications mobiles

Le développement de nouvelles générations de réseaux sans fil dépasse largement le cadre des réseaux cellulaires de type 4-5-6G. Ces derniers sont ou seront ceux qui exploitent les normes du 3GPP et les bandes de fréquences associées (en France, les réseaux d'opérateurs concernés sont actuellement ceux d'Orange, Bouygues, Free et SFR). Il y a cependant plusieurs autres grands acteurs du secteur des réseaux de communications sans fil que l'on peut voir comme des compétiteurs potentiels de la 5G dans des domaines particuliers, mais aussi comme des réseaux offrant des fonctionnalités complémentaires à celles de la 5G.

Un premier type de compétition / complémentarité concerne le domaine des réseaux sans fil personnels, domestiques et industriels. Dans cette première catégorie on peut citer les nouvelles générations de réseaux locaux à base de WiFi, qui utilisent des bandes de fréquences non licenciées. La normalisation du WiFi se déroule dans le cadre de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Les communications à base de Bluetooth, qui sont déjà centrales dans le cadre des réseaux personnels, pourraient aussi devenir des compétiteurs de la 5G industrielle.

Un second type de compétition / complémentarité qui concerne dans un sens plus général l'Internet des objets (en anglais IoT, pour *Internet of Things*) est celui des réseaux sans fil à grande portée permettant l'interconnexion d'objets à bas débit et basse consommation énergétique, tels que ceux fondés sur la norme IEEE 802.15.4 ou encore ceux considérés dans le cadre de LoRa (<https://lora-alliance.org>). Une nouveauté importante dans ce contexte est la présence d'opérateurs de ces réseaux, comme la société Sigfox en France (cf. Questions 3 et 6), qui peuvent être considérés comme opérateurs de réseaux d'un nouveau type, centrés sur ces créneaux.

Un troisième type de compétition concerne le domaine de la couverture Internet universelle. C'est l'ambition des constellations de satellites en orbite basse tels que Starlink de SpaceX aux Etats-Unis, et de plusieurs autres projets du même genre. La baisse du coût des lanceurs et des satellites ouvre des perspectives intéressantes dans ce domaine [Eu19], [Es20]. Ces réseaux satellitaires offrent toutefois des performances inférieures, notamment en ce qui concerne la latence, qui devrait être de l'ordre de 30 millisecondes, à cause des délais de propagation. Leur utilisation requiert de plus le déploiement d'une antenne séparée. Ils ne devraient donc pouvoir devenir des compétiteurs des réseaux cellulaires terrestres que dans les zones peu denses.

Si la 5G garde des atouts forts dans ces diverses compétitions, notamment celui d'une offre unifiée et universelle pour tous les types de services, la multiplication des acteurs rend cependant la situation très complexe. Cela d'autant qu'aux États-Unis, de plus en plus de prestataires d'applications deviennent des opérateurs et s'impliquent dans les infrastructures (Google et Amazon, par exemple). C'est dans ce contexte complexe qu'il faut aussi situer l'initiative *open-source* O-RAN décrite dans la réponse à la question 6.

5. Réponses aux 9 questions

5.1. Question 1 : Pourquoi de nouvelles générations ?

Quelles sont les raisons qui conduisent les acteurs du domaine à juger utile ou nécessaire de développer/déployer de nouvelles générations de réseaux cellulaires ?

5.1.1. Les besoins

Le cycle de 10 ans des nouvelles générations de réseaux cellulaires est associé à la croissance du trafic de communications que les opérateurs doivent acheminer. Pour les opérateurs, il faut pouvoir répondre à cette croissance permanente de la demande des utilisateurs, ainsi qu'à l'évolution de leurs usages actuels et envisagés pour le futur, qui pourront être assez différents des usages actuels. Les opérateurs constatent la saturation rapide de leurs réseaux 4G. Chez Orange par exemple, le trafic de données du cellulaire croît actuellement à un rythme de l'ordre de 30 % par an. Si les opérateurs n'ont pas eu de problèmes majeurs pendant les confinements de 2020 et 2021, c'est parce qu'ils avaient anticipé cette croissance et avaient donc suffisamment d'avance pour absorber l'augmentation du trafic lié à l'accroissement massif du télétravail et du télé-enseignement. Ils doivent continuer à accompagner la croissance des usages, en partie due aux vidéos (haute définition, vidéo immersive), pour pouvoir absorber les pics de consommation, voire pour pouvoir s'adapter à de nouvelles situations exceptionnelles comme celle d'un confinement. Pour pallier la saturation du réseau 4G, on pourrait envisager à court terme de densifier les antennes. Mais ceci ne peut pas être une solution sur le long terme (voir ci-dessous).

Les agences gouvernementales donnent aussi un taux de croissance de l'ordre de 30% par an pour le trafic de données sur le réseau mobile en France depuis 2018 [Ar21]. Pour ces agences, il est indispensable de constamment adapter les réseaux aux nouveaux usages (vidéo à la demande, jeux en ligne), aux marchés en progression (réalité virtuelle, réalité augmentée), à ceux qui se développent fortement depuis peu (télétravail, cours en ligne, téléconsultations), et aussi à ceux projetés pour le futur (cf. Question 3). La 5G pourrait contribuer à terme à la réduction de la fracture numérique territoriale, encore actuelle. Si les réseaux cellulaires offrent depuis longtemps des services indispensables, les capacités offertes par les nouvelles générations de réseaux cellulaires seront essentielles dans beaucoup de zones rurales non encore connectées par la fibre ou trop coûteuses à connecter par la fibre. Il est à noter que cet objectif est à long terme : l'accès Internet par modem 4G fixe est d'ores et déjà disponible chez les 4 opérateurs français, avec des performances au moins comparables à celles de l'ADSL ; il pourra évoluer de façon naturelle avec le déploiement progressif du réseau 5G dans les zones concernées.

Il est difficile de quantifier la saturation actuelle et future des réseaux 4G en France en l'absence d'études d'agences gouvernementales sur le sujet. La modélisation mathématique des réseaux montre toutefois que le débit de crête qu'un réseau cellulaire de type 4G peut fournir décroît

quand la densité des stations de base dépasse un certain seuil et tend même vers zéro si on densifie indéfiniment le réseau. Cet effet, qui est dû à l'augmentation des interférences, peut être corrigé par une focalisation appropriée des ondes vers l'utilisateur (voir l'encadré). Ceci explique l'importance pour la 5G et la 6G des techniques de focalisation et de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) décrites dans les questions 2 et 4. Un autre moyen de corriger ceci est d'augmenter la largeur de bande. C'est ce que font aussi les nouvelles générations de réseaux cellulaires qui exploitent ou exploiteront de nouvelles bandes de fréquences et notamment les ondes millimétriques. Ces dernières constituent la seule solution possible pour l'élargissement massif des bandes de fréquences utilisables.

La raison d'être de la 5G à moyen terme n'est pas seulement l'amélioration des capacités et donc des débits offerts aux abonnés des opérateurs, mais bien davantage la mutation de l'industrie, des services et des transports qu'elle devrait permettre. La production industrielle du XXI^e siècle devrait être transformée de façon essentielle par les nouvelles générations de réseaux avec le développement de l'Internet des objets (en anglais IoT, *Internet of Things*). Un bon exemple est la gestion par la 5G, déjà en place, du grand port de Qingdao en Chine. Gérant l'ensemble des navires et des conteneurs, elle donne une illustration concrète de ce que pourrait devenir l'interaction à grande échelle entre hommes, outils informatiques et objets connectés dans un avenir proche, grâce à la 5G. D'autres expérimentations sont en cours à Rotterdam, Anvers, Hambourg, Le Havre, Bordeaux. Il en va de même pour l'évolution de la productique (Industrie 4.0) et des services où les nouvelles générations de réseaux devraient devenir un des facteurs de compétitivité. Sur le plan international, la raison d'être de la 5G à moyen terme est donc plus fondamentalement la mutation de l'industrie, des services et de la mobilité qu'elle permettra que l'amélioration des débits offerts aux abonnés des opérateurs. Par exemple, en Allemagne, des bandes de fréquences 5G sont déjà proposées aux grands acteurs de la production industrielle (notamment automobile).

Références relatives à la question 1 : [Ar20], [Ar21]

5.1.2. Craintes du public et autres objections liées à la question 1

Une des objections souvent formulées à l'encontre de la 5G est qu'elle ne correspond à aucun réel besoin. Cette objection est injustifiée à deux titres. D'une part, comme indiqué ci-dessus, à moyen terme de façon générale et à court terme pour les zones dense, la réponse des opérateurs à l'augmentation du trafic de données sur la 4G ne peut pas être la simple densification du réseau 4G. Mettant en œuvre de nouveaux modes de communications sans fil plus efficaces et utilisant de nouvelles bandes de fréquence, la 5G est une bien meilleure réponse (cf. Question 2). D'autre part, cette objection ne prend pas en compte le rôle à venir de ce type de communications dans l'industrie et les services (cf. Question 3), puisque la 4G n'est aucunement conçue pour fournir des réseaux denses de machine à machine.

Pour la 5G comme pour beaucoup d'autres domaines, une partie de la société a l'impression d'être entraînée dans une course sans fin et dans des directions choisies sans concertation, en l'occurrence par l'État et les opérateurs de réseaux de télécommunications. En fait, la R&D suit dans le domaine des réseaux de communications une trajectoire technique qui est dictée par la saturation des réseaux actuels et qui est déterminée par des avancées scientifiques et technologiques sur le plan international (cf. Question 2). Force est de constater que tout ceci est mal compris par une partie de la population. Mais il est effectivement regrettable que ces

objections commencent à être discutées seulement après la mise en place de la 5G. On ne peut que recommander que l'industrie des télécommunications et les pouvoirs publics tirent les leçons des manques ou erreurs d'information et de communication. Ces manques et erreurs ont certainement contribué au changement de perception des réseaux qui, pour une partie de l'opinion, sont brutalement passés du statut de service essentiel jusqu'à la 4G à celui de nuisance pour la 5G. Une amélioration de l'information scientifique et technique sur ces domaines est vraiment souhaitable, tant vers le grand public que vers les décideurs. Certains choix de communication des industriels du domaine devraient aussi être sérieusement revus.

Une autre crainte est celle de l'augmentation de la fracture numérique territoriale. Le risque est que le déploiement de la 5G se fasse au seul bénéfice des zones denses, où la 4G est ou sera saturée, sans amélioration de la couverture 4G dans les zones peu denses (zones blanches). Cette objection est injustifiée en France. Sous les auspices de l'Arcep, la fibre se développe de façon massive, et les opérateurs se sont engagés à augmenter la capacité des réseaux cellulaires dans les zones rurales non fibrées à l'occasion de l'attribution des fréquences 5G. De manière plus générale, l'extension des bandes de fréquences utilisées est au contraire un atout clé pour à terme réduire cette fracture. Mais rappelons que la lutte contre la fracture numérique territoriale n'est pas l'objectif central du déploiement de la 5G, même si elle pourra y participer. En France, cette lutte est fondée sur d'autres mécanismes comme le « new deal mobile » qui associe les autorités territoriales aux politiques de déploiement de la fibre et des nouvelles stations de base.

5.2. Question 2 : bases scientifiques et transformations technologiques

Quelles sont les bases scientifiques et les transformations technologiques qui sous-tendent la cinquième génération de réseaux cellulaires ?

Références : [AS20], [Di19], [En20], [HT19], [Jo19], [Ma10], [NG15], [Te99].

5.2.1. Les bases scientifiques de la 5G et autres réseaux du futur

Les innovations scientifiques et technologiques les plus importantes des réseaux modernes sont fondées sur des transformations de l'accès sans fil et de l'architecture tant matérielle que logicielle des réseaux. Les bases de l'évolution de l'accès sans fil sont la théorie de l'information et des codes correcteurs d'erreurs, la théorie des matrices aléatoires, la théorie des communications, le traitement du signal, la physique des ondes en milieux complexes, l'électromagnétisme et la conception d'antennes. L'évolution de l'architecture des réseaux cellulaires n'est pas limitée à celle de l'accès sans fil. Le réseau de collecte est lui aussi en forte mutation, avec une utilisation de réseaux optiques et des projets de déploiement de réseaux à base d'ondes millimétriques, notamment aux États-Unis. Les transformations en informatique sont fondées sur des travaux en algorithmique (conception de protocoles de communications, algorithmique distribuée, analyse des données, intelligence artificielle), en programmation des systèmes distribués pour la virtualisation des systèmes, et en amélioration de la sécurité informatique. Les innovations dans le domaine des circuits sont multiples : nouveaux circuits pour *smartphones*, nouveaux systèmes intégrés sur puces et nouveaux microcontrôleurs pour les objets connectés.

Tout ceci s'appuie sur un vaste effort de recherche académique et industrielle sur le plan international. Grâce à ces transformations, les concepteurs de réseaux cellulaires de cinquième génération sont ou seront en mesure de proposer un accès sans fil permettant d'atteindre des débits de crête supérieurs au Gbit par seconde et des latences de l'ordre de la milliseconde (voir les encadrés pour la signification de ces termes). Il devient également possible d'organiser à partir d'un seul réseau physique différents réseaux virtuels étanches les uns des autres, ce qui est essentiel pour les applications industrielles. Ce niveau de performances va aussi permettre le développement d'une informatique temps-réel novatrice sur les stations de base : c'est ce qu'on appelle le *multiaccess edge computing* ou *MEC* (informatique accessible par les applications en périphérie de réseau), qui constitue une innovation particulièrement importante (cf. Question 3).

Latence et garanties temporelles

La latence est le délai s'écoulant entre l'envoi d'un message par une station de base et son arrivée à un terminal connecté à elle. Selon les réseaux, elle peut être arbitraire ou contrôlée. Par exemple, étant d'échelle mondiale, le réseau Internet n'offre aucune garantie temporelle pour la transmission ; ses protocoles comme TCP/IP sont fondés sur des techniques dites de meilleur effort (*best effort*) ayant pour but de partager raisonnablement les ressources entre les transmissions des utilisateurs. De même, les réseaux locaux de type Ethernet, WiFi et autres ne donnent pas de garantie temporelle, ce qui convient à la plupart de leurs utilisations.

À l'inverse, le contrôle précis des appareils dans les avions, trains ou usines demande un contrôle fin du temps et donc de la latence, qui peut être statistique ou exact selon les besoins. Dans des cas fréquents, un déterminisme temporel est strictement requis : par exemple, le pilotage d'un avion requiert l'envoi et la réception de commandes calculées par ordinateur 100 fois par seconde. Pour les voitures, les anciens bus de données filaires comme CAN, qui n'avaient pas de garantie temporelle, sont de plus en plus remplacés par des réseaux filaires pouvant offrir des garanties déterministes, comme TTP (*Time-Triggered Protocol*, développé en Autriche et aussi utilisé dans le Boeing 777), ou FlexRay développé par l'industrie automobile allemande, ce qui permet par exemple de synchroniser finement les freins. De même, dans les usines, où les automates étaient autrefois reliés par des réseaux sans garanties de latence, on utilise de plus en plus Ethernet déterministe qui offre cette garantie pour une partie modulable de sa bande passante.

Les réseaux sans fil de type 2G, 3G, et 4G ont des délais de transmission moyens qui conviennent pour le transport de la voix, qui exige peu de ressources, ou pour la connexion à Internet. La 5G permet une réduction importante de la latence moyenne autour de la milliseconde, ainsi que de ses fluctuations. Mais le temps-réel déterministe fondé sur une synchronisation fine des horloges et la réservation d'intervalles temporels à un type de communications, comme on le fait en filaire pour TTP, Ethernet déterministe ou FlexRay, n'est pas directement accessible. Par ailleurs, la qualité du lien radio dans les milieux complexes est plus sensible aux perturbations aléatoires que pour le filaire.

5.2.2. La focalisation des ondes

Dans le domaine de l'accès sans fil, un des aspects les plus innovants de la 5G est la possibilité de concentrer (focaliser) l'énergie électromagnétique émise par les stations de base dans une petite zone entourant les terminaux mobiles des utilisateurs (on parle de faisceaux directifs), alors que dans la 4G cette énergie est disséminée dans des volumes très importants (antennes essentiellement omnidirectionnelles, émettant dans un large secteur angulaire). Dans la 5G, on profite même de la complexité du milieu de propagation dans les villes et dans les bâtiments pour mieux concentrer les ondes autour des utilisateurs en exploitant les réflexions des ondes sur les murs et sur les immeubles (voir encadré). Mais mettre en œuvre ces idées ne peut se faire par simple amélioration des technologies 4G actuellement déployées, car cela nécessite de grandes mutations dans l'architecture matérielle et logicielle des réseaux cellulaires ; c'est ce qui est entrepris dans la 5G.

Pour mettre en œuvre ces innovations et focaliser les communications sans fil, on utilise à la fois les concepts de MIMO et de focalisation adaptative (voir encadrés). Une antenne simple est remplacée par des réseaux d'antennes élémentaires, comportant typiquement une centaine d'éléments, finement synchronisées par des techniques mathématiques d'optimisation. Ceci permet d'exploiter la diversité des réflexions des signaux électromagnétiques dans des milieux de propagation complexes qui sont ceux des communications cellulaires et d'améliorer significativement le débit des communications. Le MIMO entre une station de base et un seul mobile sera particulièrement important dans le contexte des ondes millimétriques puisqu'on peut concevoir pour ces ondes des réseaux d'antennes qui tiennent sur un smartphone. Une autre direction d'exploitation du MIMO est celle de type multi-utilisateur, qui concerne le traitement conjoint des émissions entre une station de base et plusieurs mobiles.

Focalisation d'ondes et efficacité énergétique

La qualité de la communication dépend du niveau d'énergie du signal électromagnétique reçu par l'antenne de l'utilisateur et donc de l'énergie émise par l'antenne de la station de base.

Antenne omnidirectionnelle : Si l'antenne de la station de base arrose un volume très large, le niveau d'énergie électromagnétique au niveau de l'utilisateur décroît très vite avec la distance émetteur/utilisateur. C'est ce qui se passe en pratique dans les réseaux actuels, où les antennes des stations de base transmettent les ondes dans un faisceau très large qui couvre un angle de près de 120 degrés. Ces antennes permettent de couvrir une zone de l'ordre de plusieurs kilomètres en milieu rural et de 500 mètres en milieu urbain dense.

Réseau d'antennes, 5G et MIMO : Pour améliorer le rendement énergétique, la 5G propose de positionner dans les stations de base des antennes intelligentes qui vont concentrer préférentiellement l'énergie électromagnétique autour des utilisateurs en évitant de la gaspiller dans un très large volume. Pour cela, au lieu d'utiliser une seule antenne, on utilise un réseau d'antennes multiples, réparties sur un panneau et comportant un nombre élevé de petites antennes élémentaires qui peuvent être pilotées individuellement. On peut alors façonner électroniquement des faisceaux beaucoup plus étroits concentrant l'énergie électromagnétique. Typiquement, ces faisceaux couvrent un angle de l'ordre de cinq degrés

qui englobe la zone où se trouve l'utilisateur. La largeur angulaire du faisceau dépend de la taille du réseau d'antennes (de l'ordre du mètre carré) et de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques (de l'ordre de 10 centimètres à 3.5 GHz). Dans une zone sans obstacle, la largeur d'un tel faisceau sera de l'ordre de quelques dizaines de mètres à une distance de 200 mètres. Cette relative concentration d'énergie autour du mobile améliore le rendement énergétique et permet de diminuer l'énergie émise par la station de base pour une même qualité de communication. On peut encore améliorer la qualité de la communication si l'utilisateur dispose aussi sur son terminal de plusieurs antennes (ce ne sera possible qu'avec les ondes millimétriques pour la 5G). On peut alors utiliser le concept de MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) qui permet d'optimiser la quantité d'information qui peut s'échanger, dans les 2 sens, entre la station de base et l'utilisateur. Il faut noter que cette technologie sera mise en place seulement plus tard, avec le déploiement des fréquences des ondes millimétriques.

Milieu complexe : Un des aspects les plus nouveaux de la 5G est de commencer à exploiter la complexité du milieu de propagation dans les villes et dans les bâtiments pour permettre de concentrer l'énergie électromagnétique sur des zones plus petites qu'en milieu rural. En effet, dans un environnement urbain, les ondes ne se propagent pas en ligne droite car elles rebondissent souvent entre les murs ou les immeubles. On bénéficie d'un effet « kaléidoscope » qui fait que, pour un utilisateur, une antenne d'émission apparaît comme bien plus grande qu'elle ne l'est physiquement. Comme c'est la taille apparente du réseau d'antennes qui fixe la concentration d'énergie, on peut focaliser les ondes sur une zone plus petite (typiquement de l'ordre de quelques longueurs d'onde – c'est à dire du mètre). Ces nouvelles idées sont apparues indépendamment dans les années 1990 dans la communauté des physiciens avec les techniques de focalisation par retournement temporel et dans la communauté des télécommunications avec l'optimisation de la capacité de transmission de Shannon en milieu complexe. Cet effet de focalisation en milieu complexe pourra conduire, dans certains environnements, à des gains majeurs en dépense énergétique pour un débit d'information donné.

Surface intelligente : Il y a cependant de nombreuses configurations où la disposition des antennes de la station de base, relativement aux mobiles et à l'environnement, n'est pas favorable et ne permet pas d'obtenir un bon effet de focalisation. Il existe une autre approche qui consiste plutôt à modifier l'environnement, soit au voisinage de la station de base, soit près de la zone où sont situés les mobiles. Pour cela, on peut fabriquer des surfaces intelligentes (RIS pour *Reconfigurable Intelligent Surface* ou LIS pour *Large Intelligent Surface*) qui fonctionnent comme des miroirs pour les ondes électromagnétiques et qui sont formées de nombreuses petites cellules élémentaires rapidement reconfigurables. C'est l'équivalent pour le domaine électromagnétique de ce qui est fait en optique lorsqu'un miroir de télescope est réalisé en combinant de nombreux miroirs individuels qui peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre pour optimiser la focalisation. Ici cependant rien ne bouge et tout est piloté électroniquement. De telles méta surfaces formées de milliers d'éléments individuels (on parle de métamatériaux reconfigurables) peuvent être très bon marché tout en permettant de diriger toute l'énergie captée par le miroir sur les mobiles autour d'une zone de l'ordre de la dizaine de centimètres. En disposant ces surfaces intelligentes à certains endroits des bâtiments et sur certains

immeubles, on peut réaliser une véritable focalisation d'énergie uniquement autour des mobiles. Ce sera une façon élégante de lutter contre le gaspillage électromagnétique. Cette approche nécessite cependant la mise au point d'algorithmes de suivi pour accompagner un mobile dans son mouvement. Il y a aussi d'intéressants problèmes d'optimisation à résoudre pour programmer ces surfaces intelligentes.

5.2.3. L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences

Pour éviter la saturation des fréquences usuelles des réseaux cellulaires (de l'ordre du GHz) et pour répondre à la croissance du trafic mentionnée en réponse à la Question 1, un des aspects originaux de la 5G dans le domaine de l'accès sans fil est de combiner à terme l'utilisation de ces fréquences usuelles pour la couverture distante (la bande des 3,5 GHz et celle des 700 MHz) avec celle des ondes millimétriques (la bande de 26 GHz) pour la couverture locale, au sein de petites cellules dont le rayon est de l'ordre de la centaine de mètres. La bande de fréquences autour de 26 GHz est plus large (quelques centaines de MHz) que celles utilisées pour les communications classiques (quelques dizaines de MHz). Cette combinaison vise à permettre à moyen terme une couverture focalisée à très haut débit avec des délais ultracourts. Les propriétés de la propagation des ondes millimétriques étant très différentes de celles correspondant aux fréquences utilisées dans les générations précédentes, car elles sont plus facilement absorbées et ont une portée moindre, il y a un vaste effort de recherche académique et industrielle dans cette direction, en physique, en théorie des communications et en algorithmique, qui a convergé vers les solutions proposées pour la 5G et qui étudie des solutions plus efficaces encore pour la suite.

5.2.4. Le passage massif au logiciel

Une autre direction nouvelle introduite par la 5G est une utilisation massive de logiciels dans les stations de base et dans le cœur de réseau, dans le but de rendre leur conception et leur fonctionnement beaucoup plus souples et de permettre en particulier une virtualisation généralisée du réseau. Ces réseaux définis par logiciel constituent une rupture au niveau des usages et des modes de déploiement. La virtualisation du réseau permet de gérer dynamiquement les ressources (on parle de SDN pour *Software-Defined Networking*). Le SDN est envisagé notamment pour créer des tranches de réseau (*Network Slicing*) spécifiques à chaque usage. Les opérateurs ou industriels pourront ainsi créer facilement des réseaux virtuels sécurisés et étanches en nombre arbitraire à partir d'un seul réseau physique, chacun dédié à un groupe d'utilisateurs, ou encore louer de façon parfaitement étanche une capacité de communications à d'autres entités. Cela permettra à chaque groupe d'utilisateurs de voir son ou ses réseaux virtuels comme des entités de communications indépendantes qu'il peut segmenter et orchestrer dynamiquement comme il le souhaite tout en les gardant modulables, avec des capacités et organisations géographiques définies par ses propres besoins. L'intelligence artificielle jouera à terme un rôle clef dans l'orchestration (voir encadré) et l'auto-optimisation de ces réseaux. Ceci rendra notamment possible le développement de réseaux industriels avec des ressources propres et donc des garanties en débit, latence et fiabilité. On peut comparer cette solution au cloud computing, qui a virtualisé la notion même de calcul informatique en permettant d'utiliser partout sur la planète les ordinateurs du nuage comme on le souhaite.

Cette fusion entre les communications et l'informatique est une innovation essentielle de la 5G, qui se concrétisera notamment par le développement du MEC. Elle constitue par rapport à la 4G une innovation fondamentale pour les applications, et donc un apport particulièrement important en termes de valorisation du réseau. On notera que cette évolution conduira toutefois à des difficultés pour définir les compétences et les responsabilités en cas de défaillances.

Orchestration

Une application qui s'exécute sur le réseau peut souvent être décomposée en tâches élémentaires qui doivent être traitées dans un certain ordre. Lorsqu'on dispose d'un ensemble de ressources de calcul et de stockage en périphérie et en cœur de réseau, le système doit allouer ces tâches élémentaires à ces diverses ressources distribuées géographiquement de façon à minimiser les latences de l'ensemble des applications en cours de traitement par le réseau à tout moment. Ce problème d'optimisation dynamique doit prendre en compte les vitesses et charges des processeurs, les délais de communication entre les ressources, ainsi que les contraintes temps réel des applications en cours de traitement. On appelle orchestration l'algorithmique en charge de cette allocation dynamique.

Il est bien sûr indispensable de s'assurer que l'ensemble des communications entre les unités locales permet bien de réaliser les fonctionnalités souhaitées d'une application distribuée, ce qui reste très délicat car les logiciels distribués du 21^e siècle sont bien plus difficiles à valider que les logiciels centralisés du 20^e siècles.

De façon générale, la 5G favorisera le passage au logiciel pour de nombreuses fonctionnalités essentielles des réseaux actuellement traitées par le matériel, ce qui facilitera leur gestion et leur optimisation. Cette tendance à faire passer le plus possible les fonctions du matériel rigide au logiciel bien plus souple se constate partout, même dans les smartphones où la partie radio est maintenant traitée principalement par du logiciel alors qu'elle l'était auparavant exclusivement par des circuits électroniques spécialisés. Mais cette tendance a été bien plus faible dans les cœurs de réseaux sans fil, restés plus traditionnels jusqu'à maintenant. Cette flexibilité conduit aussi à des questions nouvelles portant sur la localisation en périphérie ou en cœur de réseau des fonctionnalités et services du réseau. Elle rend possibles de nouvelles architectures de réseaux fondées sur une optimisation de cette localisation en fonction de la nature des services. Il y a donc là un nouveau, vaste et difficile domaine de recherche en informatique, concernant plus généralement la conception, l'intégration, la vérification, l'adaptation et l'opération des nouvelles architectures logicielles de réseaux, qui mérite d'être bien plus développé en France qu'il ne l'est actuellement.

En ce qui concerne l'accès multiple, une des nouveautés est NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*). Dans NOMA, les utilisateurs opèrent dans la même bande au même moment mais leurs utilisations des diverses ressources fréquentielles se distinguent par leurs niveaux de puissance. NOMA utilise des méthodes de codage avancées de l'information par les ondes, et le principe d'annulation successive des interférences, deux méthodes issues de la théorie de l'information. La 5G offrira aussi pour la première fois la possibilité d'agrégation et de partition des bandes de fréquences (*Bandwidth Partitioning*).

On notera aussi le développement d'une algorithmique permettant de donner des garanties sur les délais (voir encadré), grâce à une politique d'ordonnancement des transmissions et de partage des ressources du réseau. Cette dimension est essentielle dans le cadre des réseaux privés où l'opérateur pourra construire un réseau en fonction d'une qualité de service de communications prédéfinie.

Une autre direction dans ce domaine de l'algorithmique et du logiciel est celle de l'utilisation conjointe de plusieurs types d'accès radio. Un exemple simple est celui de l'utilisation opportuniste du WiFi pour pallier les situations où le débit effectif fourni par le réseau cellulaire est insuffisant, par exemple à l'intérieur des bâtiments. Les interactions avec les communications laser multi milieux et les réseaux 3D sont également des moteurs de développement importants (dans l'espace et pas seulement sur la surface terrestre : réseaux de drones, réseaux de satellites en orbite basse). Ces directions de recherche s'inscrivent aussi dans le cadre de la 6G.

5.2.5. Craintes du public et autres objections liées à la question 2

L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences, qui est à la base de la 5G, suscite des inquiétudes d'ordre sanitaire dans le public. Ces dernières sont abordées dans le cadre de la question 8.

5.3. Question 3 : les effets sur l'économie et les activités humaines

Quels sont les effets prévisibles ou probables du déploiement des nouvelles générations de réseaux sur l'économie et la société ?

Quels sont les domaines dans lesquels elles vont avoir des apports qualitatifs non atteignables par les générations précédentes ?

Références : [Ac21], [An21], [CN20], [Pw21], [We21].

5.3.1. Les hypothèses économiques

Il y a consensus dans le monde économique sur le fait que les futures générations de réseaux mobiles (5G, nouvelles générations de WiFi ainsi que les approches de type LoRa et Sigfox) auront un impact majeur sur les processus industriels et organisationnels. Les réseaux du futur pourraient aussi avoir un impact important sur la mobilité et sur un grand nombre de services. Leurs deux avantages essentiels dans ce contexte sont la diminution de la latence, ce temps nécessaire pour que les données se transmettent de la station de base au mobile, qui devient de l'ordre de la milliseconde, et le très haut débit.

L'hypothèse haute retenue par un certain nombre de rapports émanant d'institutions publiques ou d'organismes privés est une transformation potentielle de l'économie dans quasiment tous ses secteurs, un apport économique potentiel se mesurant au niveau mondial en milliers de milliards d'euros et un impact majeur sur l'emploi.

Pour tenter d'évaluer l'impact économique des nouveaux réseaux, un rapport influent [Ac21] considère chaque grand secteur d'activité et distingue trois types d'effet de l'introduction de la 5G sur le secteur considéré. L'impact direct concerne l'accroissement du PIB, des bénéfices et des emplois. L'impact indirect est dû à l'augmentation de l'activité des fournisseurs de biens et services des secteurs considérés. L'impact induit provient de l'augmentation du pouvoir d'achat des salariés de ces secteurs, résultant de leur croissance et de leurs gains de productivité. Dans

le cas particulier de l'industrie des réseaux cellulaires, l'impact direct concerne notamment la conception et la fabrication des composants électroniques, la conception des réseaux, avec leurs équipements et logiciels de contrôle, la fabrication de ces équipements par intégration des composants, le déploiement de ces équipements, l'opération du réseau et la fourniture de services. L'impact indirect concerne les fournisseurs du secteur en biens tels que les terres rares et en services tels que les services juridiques et financiers. Ensemble, les impacts direct et indirect constituent la chaîne de valeur de la 5G. L'industrie, les transports, la santé, l'agriculture, les services publics (eau, gaz, électricité...), le commerce de détail, le bâtiment, etc. font l'objet de la même analyse. Un point important est que chacune de ces chaînes de valeur devrait interagir fortement avec celle de la 5G, en termes d'économies réalisées — dans le transport, par exemple, par la réduction espérée des accidents et les économies d'énergie.

Les apports potentiels des nouveaux réseaux ne sont pas seulement strictement économiques et quantitatifs. De façon plus qualitative, ils pourraient faire progresser de façon notable un certain nombre d'objectifs sur le plan de la sécurité au travail, dans les transports, en matière de secours, dans la gestion des villes avec effets multiples sur le quotidien, dans la gestion des réseaux de distribution, dans la réduction de l'empreinte carbone, dans le développement durable, dans l'agriculture, dans l'éducation, et dans la santé. C'est le travail dans son ensemble qui pourrait se trouver profondément modifié. Tout cela donne potentiellement une dimension sociétale considérable au déploiement de ces réseaux.

Ces perspectives doivent naturellement être prises avec prudence, nous allons y revenir ; et elles ne doivent pas faire oublier les conséquences négatives possibles, dont il sera également question plus loin. Mais à l'inverse, il serait désastreux que les effets positifs, même s'ils ne sont pas à la hauteur des prévisions les plus optimistes, et même s'ils ne se font sentir que progressivement (ce qui sera sûrement le cas), soient purement et simplement oubliés, comme c'est le cas lorsqu'on réduit la 5G à une simple amélioration des services fournis par les opérateurs de télécommunications. Passer à côté des possibilités ouvertes par les nouveaux réseaux, pour notre pays et l'Europe, dans les services et dans l'industrie, serait irresponsable.

Nous passons maintenant en revue les domaines évoqués ci-dessus en veillant à distinguer les apports probables et bien identifiés de ceux qui sont seulement envisagés par les chercheurs.

5.3.2. Apports probables bien identifiés

Un premier exemple est la suppression des câbles (lourds, compliqués et chers) dans les halls d'usines par exemple, notamment pour le contrôle des robots fixes ou mobiles et des automates, en les remplaçant par des réseaux sans fil tout en gardant la même fiabilité, les mêmes capacités et des latences courtes (voir encadré). C'est dans cette perspective d'Industrie 4.0 qu'en Allemagne des bandes de fréquences 5G sont réservées aux industriels autres que les opérateurs. Ces derniers pourront donc à terme développer des réseaux privés 5G pour la production sans passer par les opérateurs de télécommunications classiques. Le passage à la 5G ou à d'autres réseaux sans fil permet ainsi d'envisager une meilleure flexibilité des chaînes de production, qui pourront être reconfigurées sans nouveau câblage. À terme, les ondes millimétriques devraient jouer un rôle important dans ce cadre.

Pour toutes les questions liées à l'Industrie 4.0, on pourra consulter les documents émanant du 5G ACIA (Alliance for Connected Industries and Automation, une émanation de ZVEI – *Zentral Verband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.*) qui rassemble notamment Bosch,

Schneider, Siemens, Nokia, Ericsson et Huawei. La société ASOCS fournit déjà une offre industrielle de réseaux 5G privés pour ce qu'on appelle maintenant l'Industrie 4.0. Voici quelques exemples concrets d'applications dans le cadre de la productique : la commande temps réel de robots, le pilotage de machines à distance, le contrôle de qualité avec alertes et arrêts d'urgence dans les lignes de production. Par exemple, le contrôle de qualité se fondera sur des retours de caméras haute définition qui alimenteront des outils d'IA permettant de détecter les anomalies en temps réel. Un autre exemple est celui de la maintenance augmentée par un opérateur se connectant sur des modèles 3D des machines ainsi que sur leur documentation tout en dialoguant avec des experts à distance ou avec le fabricant ; cela demande des hauts débits mais avec moins de contraintes temporelles. Au total, ces applications industrielles nécessitent à la fois du temps réel très fin, par exemple pour le diagnostic des machines, et des communications haut débit afin d'interagir en vidéo avec les ingénieurs et le fabricant.

Un autre domaine est la gestion temps réel de grands sites industriels en extérieur comme les mines, les raffineries ou les ports, ou de grandes infrastructures telles que les gares, les aéroports et les hôpitaux. Il faut noter que ceci est déjà un secteur d'activité important pour la 4G. Un bel exemple pour la 5G est celui des usages immersifs envisagés à court terme : par exemple le contrôle d'une grue à partir de caméras embarquées sur la grue et sans opérateur à bord, ou le contrôle à distance de plateformes pétrolières. En France, plusieurs plateformes d'expérimentations 5G sont en cours de déploiement : par la SNCF en gare de Rennes pour l'opération de la gare et le service des usagers, par les hôpitaux de Toulouse pour le transfert de patients, par Bordeaux Métropole pour la connectivité des espaces publics, etc.

Le monitoring d'infrastructures critiques est aussi concerné. Dans le domaine de la production et du transport d'électricité, les industriels ont actuellement des réseaux de communications propres. Toutefois, une très faible proportion des équipements d'un réseau électrique sont actuellement connectés à ce type de réseau ; le déploiement d'un réseau 5G privé qui connecterait l'ensemble de ces équipements est aujourd'hui envisageable.

La collectes de données par des capteurs disposant de faibles ressources en énergie et répartis dans les milieux urbains ou naturels va devenir un domaine très important. Le créneau de l'Internet des objets (*Internet of Things* ou IoT) est aussi couvert par des protocoles de type LoRa, Sigfox ou IEEE 802.15.4, et des services d'opérateur sont offerts par des sociétés telles que Sigfox. Des protocoles similaires ont aussi été normalisés par le 3GPP sur des bandes de fréquences sous licence, notamment *NarrowBand* IoT ou LTE-M. Un exemple central est celui de la surveillance de réseaux électriques dans un bâtiment ou de réseaux de distribution moyenne tension, avec le déploiement de capteurs capables de détecter la montée en température de câbles ou le début de fusion des gaines. Cet exemple à lui seul explique l'ambition de la 5G de connecter jusqu'à un million d'objets IoT (capteurs et actionneurs) par kilomètre carré en milieu urbain. Les autres applications concrètes et indiscutablement utiles de l'Internet des objets sont nombreuses : capteurs pour la surveillance des structures, la détection de pollutions, la détection de gel ou de sécheresse en agriculture, etc. Mais pour la 5G, comme pour les autres réseaux d'objets, le coût des circuits et la consommation électrique sont des points clés.

Dans le domaine de la médecine, au-delà de la téléconsultation et de l'hôpital connecté, les réseaux devraient avoir des implications clairement identifiées dans des secteurs aussi divers que le suivi interactif des patients à distance, déjà en place pour les pacemakers (stimulateurs

cardiaques) et les pompes à insuline, la réalité augmentée en relation avec le diagnostic et la chirurgie outillée par la réalité augmentée qui sont en cours d'études dans des Instituts Hospitaliers Universitaires (IHU). L'apport potentiel de la 5G dans ce domaine est de nouveau celui des garanties de délai et de débit, qui sont essentielles notamment dans le cadre de la réalité augmentée.

5.3.3. Perspectives pour les transports

Détaillons un peu plus quelles perspectives sont ouvertes par les garanties de délai, de débit et de fiabilité des réseaux dans le domaine des transports. On peut distinguer deux grandes classes de perspectives.

D'abord, celle des véhicules autonomes, la plus connue du public actuellement. Dans les versions de type Google ou Uber, ces véhicules utilisent principalement des capteurs multiples et des outils d'intelligence artificielle embarqués pour la prise des décisions de navigation. Dans les versions de type navette autonome avec trajectoire prédéfinie, les décisions à prendre à partir des informations fournies par les capteurs embarqués sont plus simples. Il est envisagé que ces décisions utilisent aussi les communications entre la navette et l'infrastructure ; dans ce cas, les réseaux cellulaires pourraient jouer un rôle important. Une plateforme expérimentale 5G pour le véhiculaire est en phase de démarrage à Saclay.

Ensuite, celle du V2X où les véhicules échangent à intervalles réguliers des messages d'information de position et de vitesse ainsi que des informations obtenues par les capteurs embarqués. Ces échanges de messages peuvent être utilisés pour des applications spécifiques comme celle des trains de camions sur les autoroutes ; en réduisant les distances entre camions à 10 ou 20 cm, l'amélioration aérodynamique ferait gagner 20% en consommation. De manière plus générale, le V2X pourrait jouer un rôle important dans le domaine de la prévention des accidents de la route. À terme, ces échanges pourraient se faire entre les véhicules ainsi qu'avec les piétons, les cyclistes et l'infrastructure en utilisant le partage des communications cellulaires par tous ces protagonistes – sous réserve bien entendu d'un traitement des données personnelles (position, etc.) bien réglementé et maîtrisé. Ce point devrait être abordé dès maintenant pour qu'on ne se trouve pas débordé, notamment par des questions de sécurité, comme cela a été le cas pour d'autres applications.

5.3.4. Pertinence des perspectives

Certaines des perspectives sont réalistes : les navettes autonomes, l'amélioration de la sécurité des transports grâce au V2X ou encore l'organisation de cohortes de véhicules sur autoroutes. Pour d'autres, il n'y a pas de certitude de faisabilité au stade présent : véhicule autonome certifié, remplacement des feux aux intersections par des communications entre l'infrastructure et les véhicules ou entre les véhicules. L'acceptation du V2X par la société sera sans doute bien différente en Europe, en Amérique et en Asie, pour ne citer que ces trois régions du monde. En premier lieu, tant pour le cas du véhicule autonome que pour celui du V2X, les cadres légaux déterminant les responsabilités en cas d'accident sont très différents dans ces trois régions, et même parfois utilisés comme instruments de guerre commerciale. D'autre part, l'acceptation du principe des échanges avec d'autres véhicules et avec l'infrastructure ne sera certainement pas elle aussi la même dans ces différentes cultures. Enfin, les investissements considérables nécessaires à l'équipement des villes et des routes permettant les échanges entre véhicules et infrastructure ne seront probablement pas envisageables sous les mêmes modalités dans ces

trois régions et même à l'intérieur des régions, selon la nature du territoire, centre-ville, autoroute, zone rurale, etc., et selon les coûts de mise en place. Tout ceci devrait avoir des conséquences importantes sur le développement et l'utilisation de ces techniques. L'appréciation par les constructeurs automobiles de l'importance de la 5G pour leur domaine est donc très différente suivant les continents. Soulignons cependant les succès techniques obtenus dans le domaine du V2X par Qualcomm aux États-Unis quant à la possibilité d'une bonne interaction entre le V2X et la 5G. Il est également à noter que la Commission européenne a une stratégie pour déployer la 5G le long de tous les axes structurants d'ici 2025. Ces questions dans leur ensemble sont étudiées par le 5GAA (5G Automotive Association) qui regroupe les industriels de l'automobile et ceux des communications.

5.3.5. Des objets connectés à l'Internet des objets

Une première observation importante est que dans tous les domaines cités ci-dessus (Industrie 4.0, Santé, Transports), les objets connectés au sens large n'ont pas attendu la 5G pour se multiplier. D'après l'association GSMA (*Global System for Communications Association*) il y avait 12 milliards d'objets connectés tous types confondus en 2019 et leur nombre devrait être de 25 milliards en 2025, mais dans des catégories très variées dont plusieurs ne nous concernent pas ici. D'après *Global Markets Insights*, en 2021, les secteurs les plus importants du marché des microcontrôleurs sont la productique, la défense, l'électronique grand public, la santé et l'automobile. Nous avons déjà dit que l'objectif de la 5G dans ce domaine est de permettre d'interconnecter au besoin un ordre de grandeur d'un million d'objets par kilomètre carré, ce qui n'est aucunement possible avec la 4G.

La 5G a donc pour ambition de généraliser l'action à distance en temps réel et de fournir ainsi une base pour la transformation numérique d'un vaste ensemble de secteurs d'activité. La convergence des systèmes d'information, des systèmes de communications et des systèmes de contrôle commande d'infrastructures est en train de s'opérer. La 5G devrait y jouer un rôle clé. Associée au cloud computing, au *multi access edge computing* (MEC) et aux objets connectés, la 5G rend possible un continuum données–information–connaissance–calcul–services. La notion de systèmes cyberphysiques, c'est-à-dire de systèmes physiques commandés et surveillés par informatique, traduit cette transformation unificatrice. Cependant, la plupart des applications en question posent des problèmes massifs de sécurité informatique qui seront probablement un frein à leur développement, parce que les objets connectés à basse consommation énergétique restent difficiles à sécuriser. La masse actuelle des objets connectés peu ou mal sécurisés a d'ailleurs déjà été utilisée pour des attaques massives.

La part des connexions IoT à venir qui seront couvertes par la 5G à terme reste cependant difficile à prévoir. Dans la compétition avec LoRa et Sigfox d'un côté, ou avec les nouvelles versions du WiFi (WiFi 6), la fonction IoT de la 5G a des atouts importants (universalité, système unique pour toutes les fonctionnalités, économie d'échelle, garanties de délais), mais la bataille n'est pas gagnée d'avance. L'Internet des objets, notamment dans sa composante industrielle, sera dans tous les cas une composante prédominante des réseaux sans fil du futur.

5.3.6. Apports envisagés à plus long terme

L'idée globale la plus séduisante est celle d'une fusion des capacités du réseau cellulaire, des capacités des capteurs de l'Internet des objets connectés, des capacités de mémorisation et de calcul de l'informatique, de l'IA périphérique ou embarquée et du cloud computing, fusion qui

permettrait d'offrir des nouveaux services temps réel de type réalité augmentée nécessitant de fortes puissances de calcul, des débits élevés et des délais de transmission très courts. Certains experts prédisent dans cette direction la création d'un nouveau tissu industriel de services numériques en périphérie des réseaux, au-delà des applications industrielles évoquées ci-dessus, avec le développement de nouveaux services temps réel de type réalité augmentée, en exploitant les capacités et les délais offerts par le réseau 5G et la courte distance entre la station de base et le client. Ceci permettra par ailleurs aux opérateurs cellulaires d'ouvrir leur réseau d'accès sans fil à des développeurs d'applications et des fournisseurs de contenu ou à développer eux-mêmes des applications de ce type.

5.3.7. Craintes du public et autres objections liées à la question 3

Les usages prévus sont-ils certains ? Comme expliqué ci-dessus, même s'il est certain que la numérisation sera un élément clé de compétitivité de la production industrielle, il n'est pas possible de dire actuellement quelle technologie de communications l'emportera sur les autres et à quelle échéance l'Industrie 4.0 se développera. La 5G peut être vue comme un moyen pour accélérer la transformation numérique des services et de l'industrie en France et en Europe. En ce qui concerne les applications plus futuristes, l'expérience montre que la prédiction des usages qui seront dominants dans les nouvelles générations de réseaux de communications est par nature très difficile. Dans ce domaine, les développements scientifiques et technologiques précèdent bien souvent l'explosion des usages, parfois de plusieurs décennies. Par exemple, née dans les années 1950, la théorie de la communication et de l'information de Shannon a précédé le développement des réseaux cellulaires d'une quarantaine d'années ; l'Internet a aussi précédé l'explosion de la toile, des moteurs de recherche et des réseaux sociaux de manière très significative ; plus récemment, la 3G a été initialement développée dans le but d'offrir des services de visioconférence qui ne se sont jamais répandus, et c'est seulement l'arrivée ultérieure de l'iPhone qui a conjointement fait le succès du smartphone et des réseaux cellulaires 4G que nous connaissons actuellement. Dans le cas de la 5G, l'amélioration de la bande passante et de la latence devrait donc conduire à la création de nouveaux services dont on n'a pas idée aujourd'hui.

Les apports futurs de la 5G sont-ils utiles ? Il est effectivement regrettable que certains acteurs du domaine survendent des applications peu crédibles ou d'intérêt marginal. La justification du déploiement de ces réseaux par la croissance de la demande en jeux en ligne par exemple, doit aussi être analysée sous plusieurs angles, notamment l'angle énergétique. De manière générale, la question de l'utilité est à prendre avec prudence pour tout ce qui a trait à des applications qui n'existent pas encore. Toutefois, comme déjà expliqué dans la réponse à la Question 3, cette nouvelle génération de réseaux est conçue pour avoir un impact majeur sur l'industrie et les services. À ce titre, son utilité potentielle est claire pour les industriels concernés.

Certains recommandent un retrait de notre pays du processus général de conception et de déploiement de ces nouveaux réseaux. Une objection en retour est celle du coût économique et sociétal d'un tel retrait. Dans le contexte qui vient d'être exposé, il serait désastreux de renoncer à tout rôle dans la maîtrise de ces réseaux et dans l'orientation à leur donner dans le futur. C'est la condition pour pouvoir tirer les bénéfices de tous ordres qu'on peut en attendre. Y participer est également nécessaire pour comprendre les risques qu'ils comportent, et donc pour être en mesure de les limiter. Il en va de même en ce qui concerne les alternatives à la 5G

évoquées ci-dessus pour certains secteurs. C'est en comprenant et maîtrisant les enjeux scientifiques et technologiques du domaine que nous pourrons influencer sur la compétition entre la 5G et ces alternatives. Comme les autres régions du monde, l'Europe s'engage d'ailleurs dans cette direction en considérant le domaine comme stratégique (cf. Question 9).

5.4. Question 4 : vers la 6G ?

Peut-on anticiper ce que sera la 6G ?

Y a-t-il de la recherche en France et en Europe sur ces questions ?

Références : [DD19], [He21], [SW20].

5.4.1. Les apports prévus de la 6G

Il est essentiel de comprendre qu'il y a et qu'il y aura dans ces domaines un flot continu d'innovations scientifiques et technologiques structuré en générations successives. La 6G ne commencera à être normalisée que dans une dizaine d'années ; ce nom reste donc encore informel. Mais les recherches sur une nouvelle génération sont déjà bien engagées. Parmi les innovations étudiées, citons les suivantes :

L'amélioration de l'accès radio par la focalisation individualisée. Les antennes de la 5G utilisent un ensemble fixe de faisceaux de focalisation et le mobile passe d'un faisceau au suivant lors de son déplacement. Une des nouvelles directions de la 6G sera le suivi individuel des mobiles au moyen des méthodes de focalisation adaptatives comme celles décrites ci-dessous.

L'utilisation de surfaces intelligentes pour améliorer l'accès radio et diminuer la consommation énergétique. Ces surfaces se comportent comme des miroirs intelligents qui redirigent toute l'énergie électromagnétique qu'elles captent sur les mobiles des utilisateurs. Ces surfaces sont divisées en quelques centaines de pixels agissant comme un ensemble de micromiroirs qui sont contrôlés en temps réel pour orienter de façon optimale le faisceau réfléchi vers l'utilisateur. Ces surfaces passives intelligentes pourront devenir très bon marché en ne consommant pratiquement aucune énergie. Ceci est à comparer à la consommation des nombreux composants électroniques qui gèrent la focalisation à partir des réseaux multiples d'antennes de la 5G. Ces surfaces pourront ainsi permettre de diminuer de façon très significative l'énergie envoyée par les stations de base classiques.

L'utilisation d'autres bandes de fréquences (de 100 GHz à 3 THz).

L'amélioration de la résilience des réseaux, ce qui va bien au-delà de l'amélioration de la fiabilité, puisqu'il s'agit de résister à des attaques physiques ou logicielles de nature très variée et potentiellement destructrices.

L'intégration de la robotique industrielle fixe ou mobile et des communications, qui sera un axe central de la 6G.

L'intégration de technologies de communications cellulaires et de technologies radar et lidar, tant sur les stations de base que sur les terminaux. Cette intégration sera particulièrement importante dans le domaine du trafic autonome (fusion de données de capteurs radar ou lidar et d'informations V2V ou V2X) et dans celui de la robotique domestique, deux domaines où les européens ont des atouts de premier plan.

L'utilisation de méthodes d'IA, notamment pour une utilisation adaptative et intelligente des bandes de fréquences (ce qu'on appelle l'accès radio cognitif).

Le développement d'environnements numériques mobiles (human-centric networking), où les fonctionnalités disponibles en périphérie de réseau sont dynamiquement adaptées aux besoins temps réel spécifiques de l'utilisateur, si bien que l'environnement numérique de l'utilisateur (bases de données, réalité augmentée, outils d'IA) l'accompagne dans sa mobilité.

Une nouvelle diminution de la latence, qui conduirait au développement de l'Internet tactile, un environnement réseau permettant la transmission en temps réel des informations haptiques (transmises par le toucher) sur Internet, en plus des trafics audiovisuels et des données.

5.4.2. Les investissements dans le monde

Les investissements des États dédiés à la 5G, puis ceux annoncés pour la 6G, sont colossaux car ils se chiffrent en dizaines de milliards d'euros sur le plan mondial. En Corée du Sud, les recherches sur la 6G ont commencé en 2019 et un programme sur l'économie digitale incluant la 6G a été lancé en 2021. En Chine, la recherche sur la 6G a aussi commencé en 2019. Selon le journal d'État China Daily, un plan visant à faire progresser la 6G entre 2021 et 2025 vient d'être lancé dans le cadre d'un objectif plus large appelé « Chine numérique ». Le financement par l'État chinois sur ces questions serait de 22 milliards de dollars sur 15 ans. Un programme de recherche et développement entre les États-Unis et le Japon vient aussi d'être annoncé en 2021, avec un budget de 4.5 milliards d'euros. En janvier 2021, la Commission européenne a officialisé le lancement d'un projet de recherche sur la 6G baptisé Hexa-X. Au total, ce sont 25 industriels et universités qui prennent part à la réalisation de ce projet de 11 millions d'euros sur deux ans et demi. Ceci s'inscrit dans un plan de recherche 6G et de développement 5G de 900 millions d'euros.

5.4.3. Craintes du public et autres objections liées à la question 4

Alors que la 5G commence tout juste à être déployée, et est loin d'avoir atteint son plein potentiel, l'annonce de la 6G peut apparaître comme un nouvel exemple de la marche forcée vers toujours plus d'innovation, en particulier vers de l'innovation qui ne contribue pas nécessairement au bien-être général, mais à des activités de divertissement et de consommation qui profitent surtout aux entreprises qui les commercialisent et à la population qui peut se les permettre. C'est là se méprendre sur le processus qui mène d'une génération à la suivante. Ce sont les impératifs de synchronisation et de normalisation qui imposent le saut, comme il s'en est produit pour les générations précédentes et comme il s'en produira entre la 5G et la 6G. Mais le processus fondamental sous-jacent est en réalité continu. Il est animé non par le désir de développer telle ou telle application particulière, mais par la poursuite constante de progrès en matière d'efficacité des réseaux de communications sur tous les plans : en particulier économie d'énergie, résilience et sécurité.

Une autre crainte qui s'exprime est à l'inverse celle d'un déclassement non seulement national mais aussi européen. L'Europe est très consciente du danger : la Communauté européenne et les États membres redoutent de se retrouver en position de clients d'autres nations, et comprennent que pour l'éviter et rester dans la course il faut maintenir, voire reconstruire une recherche créative et protéger les industriels européens de toute forme de concurrence déséquilibrée.

5.5. Question 5 : la situation industrielle et académique.

Quelle est la situation industrielle et académique dans ce domaine au niveau français, européen et mondial ?

Sur le plan scientifique et industriel, quelles sont nos forces et quels sont nos investissements actuels dans ces domaines ?

Références : [NG21], [TP21], [YW20].

5.5.1. Les acteurs mondiaux

Sur le plan scientifique et technologique, dans le domaine des réseaux cellulaires et pour beaucoup d'observateurs, la Chine est devenue, avec Huawei et ZTE, l'acteur qualitativement et quantitativement dominant (voir par exemple les publications dans les grandes conférences sur les réseaux). Elle maîtrise la science et la technologie du THz, du traitement du signal, des algorithmes de recherche opérationnelle, des déploiements massifs de réseaux, mais pas encore celles de la gravure ultrafine des circuits (5nm évoluant vers 3nm), disponibles en Corée et à Taiwan et bientôt aux USA par l'installation d'une usine de TSMC (*Taiwan Semiconductor Manufacturing Company*), le leader du domaine.

Pour les équipements de réseaux, les États-Unis avaient avec Lucent, Qualcomm et Cisco une excellente position il y a une vingtaine d'années. Qualcomm joue toujours un rôle clé dans le domaine des réseaux sans fil. Toutefois les États-Unis n'ont plus actuellement d'équipementier de réseaux généraliste. La NSF vient de faire connaître ses priorités pour son budget 2022 : science de l'information quantique, intelligence artificielle, biotechnologie, technologies sans fil avancées, fabrication de pointe et recherche en microélectronique, changement climatique et énergie propre. Dans le domaine des communications, la NSF lance son programme RINGS (*Resilient and Intelligent NextG Systems*), qu'elle décrit comme son « effort le plus important à ce jour pour engager des partenaires publics et privés à soutenir conjointement un programme de recherche ».

La Corée du Sud avec Samsung est très en avance sur le secteur des ondes millimétriques. Elle a aussi été le premier pays au monde à lancer des services 5G à l'échelle nationale, avec trois réseaux mis en service en avril 2019. Le pays affiche également le taux de pénétration le plus élevé au monde avec 7,8 millions de Sud-Coréens utilisant des smartphones avec connectivité 5G, soit 15 % de la population.

5.5.2. Les acteurs européens

Contrairement au contexte des plateformes de type GAFAM, la situation industrielle de l'Europe n'est pas mauvaise dans ces domaines, puisque deux des concepteurs de réseaux cellulaires sont européens : Ericsson et Nokia. Dans le domaine de la 5G, leurs parts de marché sont de l'ordre de 10 à 20% pour chacun et ils disposent de nombreux brevets. Toutefois, l'avenir de ces deux groupes industriels est incertain. Il est essentiel de conforter et de développer la capacité de conception et de production d'équipements de télécommunications en Europe. En ce qui concerne la recherche européenne, l'Université d'Oulu en Finlande est le leader pour la 6G : voir <https://www oulu.fi/6gflagship/>. Parmi les autres acteurs européens importants, on trouve l'université de Dresde en Allemagne en collaboration avec Vodaphone, l'université

d'Aalborg au Danemark, l'université de Linköping en Suède ainsi que le CTTC à Barcelone. La Commission européenne a financé un grand nombre de projets sur la 5G dans le cadre du programme H2020. Un consortium européen nommé Hexa-X a aussi été constitué pour pousser au développement de la 6G (cf. Question 4).

5.5.3. La situation française

La situation industrielle en France est la suivante : Alcatel a fusionné avec Nokia en 2015, Nokia employant actuellement plus de 3 500 personnes dans ces domaines en France. Sa partie recherche, Nokia Bell Labs, a par ailleurs des partenariats actifs avec Télécom Paris et Inria. Nokia maîtrise l'ensemble des problèmes de télécommunications et met l'accent sur la sécurité. Un autre acteur important est Thalès qui s'intéresse aux technologies duales civiles et militaires, ainsi qu'à l'exploration des bandes de fréquences élevées. Au niveau des semi-conducteurs, STMicroelectronics est très investi dans les circuits dédiés en particulier à l'encodage de l'information pour la rendre robuste aux erreurs de transmission (Shannon). Orange est le seul opérateur qui fasse de la recherche, même si son activité amont s'est fortement réduite et s'est focalisée sur les usages et applications. Il y a aussi quelques entreprises de taille moyenne comme Sequans et de nombreuses petites entreprises (localisées notamment en Île de France, à Rennes et à Sophia-Antipolis) dont l'activité de recherche est, sauf exception, limitée. Il est à noter que Huawei a une position à part, en ouvrant en Europe des centres de R&D très amont. Ericsson emploie pour sa part 1500 personnes en France.

Les forces académiques sont présentes dans les UMR CNRS suivantes : L2S (connectivité, surfaces reconfigurables, en collaboration avec TCL, Nokia ou Orange), IETR (codage et antennes, avec l'IRT B2com, en collaboration avec Orange), ETIS (MIMO massif, accès, et sécurité, en collaboration avec Orange, Nokia et Altran). Hors CNRS, on trouve une activité importante au LTCI-Telecom Paris (connectivité), à Eurecom (connectivité, accès et sécurité), au CEDRIC-CNAM et chez Inria. Le L2S, l'ETIS et le LTCI ont la particularité d'associer des recherches fondamentales en théorie de l'information aux télécommunications. Le CEA est quant à lui plutôt centré sur une démarche de valorisation proche de l'industrie.

5.5.4. Les autres réseaux sans fil

L'activité industrielle dans les autres réseaux potentiellement concurrents de la 5G est très importante elle aussi. Le domaine des constellations de satellites en orbite basse est actif dans plusieurs pays, tout particulièrement aux États-Unis avec Starlink. En Europe, ce sujet est étudié par l'ESA et jugé comme critique par le commissaire européen Thierry Breton. Le secteur de l'IoT industriel à faible consommation est lui aussi très actif. L'activité est structurée autour d'associations telles que LoRa et de nouveaux opérateurs tels qu'Actility, qui utilise les normes de LoRa, ou Sigfox, qui utilise une technologie propriétaire. Les objets connectés utilisent des circuits spécifiques, qu'on appelle des microcontrôleurs. L'Europe a des points forts dans ce secteur des circuits avec notamment STMicroelectronics.

5.5.5. Craintes liées à la question 5

Pour les 2G et 3G, la France était en pointe sur la conception et la réalisation des réseaux mobiles. L'affaiblissement de la puissance industrielle dans ce secteur va de pair avec une forme d'effacement scientifique. Les causes de ces évolutions sont clairement liées : la compétition industrielle déséquilibrée et le manque d'un effort planifié de recherche publique et industrielle

conduisent à des difficultés économiques dans l'industrie européenne et aussi à une attractivité moindre auprès des étudiants, ce qui en retour réduit la créativité dans le domaine. On peut donc craindre une perte majeure d'influence de notre pays et de l'Europe. Il convient donc de travailler à mieux faire comprendre la nature et les enjeux de ces nouveaux domaines scientifiques et technologiques ainsi que les forces dont nous disposons. Il convient aussi de veiller à ce que ces sujets restent ou reviennent dans les priorités des universités, des grandes écoles ou des instituts de recherche français.

La question des circuits électroniques est particulièrement préoccupante. Malgré des points forts dans certains secteurs connexes (STMicroelectronics, dans le domaine des microcontrôleurs, et ASML, dans celui de la fabrication de machines de photolithographie qui permettent la gravure des circuits), l'Europe n'est plus en mesure de concevoir et produire les circuits à la gravure ultrafine comme ceux des *smartphones* actuels. Il y a une prise de conscience de cette faiblesse et une volonté de la corriger au niveau européen.

5.6. Question 6 : les ressorts institutionnels

Quels sont les ressorts institutionnels actuels de l'innovation dans ces domaines (programmes incitatifs, agences de financement de la recherche, agences de normalisation) ?

Références : [Or21], [3G15] et [3G17].

5.6.1. Les normes mondiales

L'évolution des réseaux cellulaires est très fortement structurée par des normes mondiales élaborées par le 3GPP. La Release 15 de la norme 5G a été validée en 2019 (<https://www.3gpp.org/release-15#>). Elle précise l'utilisation des nouvelles bandes de fréquences, le MIMO massif et la focalisation, ainsi que les méthodes de contrôle de la latence. Les normes de la 5G spécifient pour la première fois les limites sur la puissance d'émission des stations de base, ce que ne faisaient pas les générations précédentes. La Release 16 sera centrée sur l'Internet des objets industriels (voir l'exemple du port discuté précédemment) et notamment sur la virtualisation et la réduction de la latence. Cette évolution se fonde sur un effort international de grande ampleur tant dans le monde industriel que dans le monde académique, particulièrement vigoureux en Asie et aux États-Unis, ainsi que dans plusieurs pays européens, notamment l'Allemagne, la Suède et la Finlande.

Le rôle actuel des agences de normalisations acceptées par tous, telles que le 3GPP, l'ESTI, l'IEEE, l'IETF, l'UIT, ou le W3C est un des points forts du domaine, qui tranche fortement avec ce qui se passe par exemple dans le domaine des circuits. Cette situation n'est cependant pas un acquis définitif.

5.6.2. L'alliance O-RAN

Une direction intéressante est proposée par l'alliance O-RAN (pour *Operator Defined Open and Intelligent Radio Access Networks*), un consortium international qui rassemble un grand nombre d'opérateurs et qui vise à séparer la partie radio de la partie logiciels de contrôle et d'optimisation du réseau. Cette segmentation aurait pour avantage d'identifier des fonctionnalités et des secteurs précis (électronique, couches physiques, antennes et traitement

du signal d'une part, algorithmique du partage de ressources et logiciel d'autre part) qui pourraient être conçus et programmés indépendamment, en particulier en utilisant des logiciels libres. Un des avantages pour les opérateurs serait de pouvoir utiliser des équipements provenant de constructeurs différents. Une telle solution crée toutefois une nouvelle interface qui pourrait avoir pour inconvénient de ralentir la transmission des données. De plus, la responsabilité des garanties de délais de bout en bout serait alors partagée entre deux entités différentes. Cette direction ne fait donc pas l'unanimité.

5.6.3. Les programmes de recherche

Dans le domaine des réseaux de communications, les programmes nationaux (ANR) et européens se sont focalisés ces dernières années sur les aspects « verticaux », c'est-à-dire sur les applications de ces réseaux à d'autres secteurs d'activité. Ceci s'est fait au détriment des activités de conception des réseaux eux-mêmes. Il y a donc des rééquilibrages à faire dans ce secteur. Voici deux suggestions visant à améliorer cette situation :

- autoriser des projets ANR amont, sans nécessité de développer un démonstrateur matériel ;
- pousser les industriels du domaine à participer aux projets collaboratifs.

5.6.4. Craintes liées à la question 6

Les tensions actuelles entre les États-Unis et la Chine pourraient conduire à terme à un éclatement du consensus actuel sur la normalisation 3GPP et IETF dans ces domaines, ce qui pourrait considérablement modifier le paysage.

Une autre crainte est celle d'une captation de la valeur générée par les réseaux cellulaires par les plateformes de type GAFAM. En simplifiant, dans ce schéma, l'accès radio devient une simple commodité utilisée par les futures plateformes pour les divers services envisagés dans le cadre du calcul en périphérie de réseau (*Multi-access Edge Computing*). La segmentation envisagée par l'alliance O-RAN renforce cette crainte.

5.7. Question 7 : l'impact sur l'environnement

Quel est l'impact prévisible de ces réseaux sur l'environnement, notamment sur la consommation énergétique ?

Références : [Ai20], [Ge16].

5.7.1. La part du numérique dans la consommation énergétique

L'impact environnemental des communications numériques dépend de plusieurs facteurs : la consommation électrique globale du système, la production des matériels et notamment des terminaux mobiles (*smartphones*, tablettes, objets connectés) et les effets induits des augmentations de volume et de fonctionnalités.

Pour répondre à la question de la consommation énergétique, il convient de donner quelques ordres de grandeur, et aussi de distinguer la consommation des technologies de l'information dans leur ensemble de celle des réseaux cellulaires. Depuis la révolution industrielle, la

consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Selon le rapport 2020 de l'Agence internationale de l'énergie, la consommation mondiale d'énergie primaire s'est élevée en 2018 à 14 282 Mtep. L'électricité a compté pour 30% de cette consommation. La part du numérique est estimée aujourd'hui entre 10 et 15% de la consommation électrique, soit entre 3 et 4,5% de la consommation mondiale d'énergie primaire. La répartition de la consommation électrique du numérique est la suivante : 6% pour les réseaux et infrastructures, 18% pour les serveurs et data centers, 37% pour les équipements professionnels et 39% par les équipements domestiques. Selon ces chiffres, la part de l'infrastructure des réseaux de communications dans leur ensemble (filaire et radio), hors terminaux, est actuellement d'un ordre de grandeur de 2 à 3 pour mille de la consommation mondiale d'énergie primaire.

On notera aussi que la question de la dépense énergétique est différente de celle de l'empreinte carbone, qui est la plus importante pour les dangers futurs, puisqu'on peut produire de l'électricité décarbonée. Cette dernière question se pose de manière différente dans des pays comme la France ou la Suède, où la production d'électricité est largement décarbonée, que dans d'autres comme la Chine, où elle l'est encore peu. Il convient aussi de prendre en compte la possibilité de production locale d'électricité pour les stations de base.

Les technologies de l'information sont toutefois en forte croissance. Par exemple, le trafic des réseaux cellulaires croît actuellement de 30 % par an en France (cf. Question 1). Par ailleurs, on observe dans ce domaine de nombreuses pratiques sous-optimales en termes de consommation énergétique. Le développement de techniques informatiques surconsommatrices de ressources énergétiques comme le big data, l'apprentissage automatique ou la *blockchain* ne fait qu'aggraver cette tendance. On notera que la croissance de la dépense énergétique dans ce domaine n'est pas nécessairement proportionnelle à celle du trafic. Par exemple, dans une étude publiée le 28 février 2020 dans la revue *Science*, il est établi que la quantité de calcul dans les data centers a plus que quintuplé entre 2010 et 2018, alors que leur quantité totale d'énergie électrique consommée n'a augmenté que de 6% sur la même période.

5.7.2. La consommation énergétique de la 5G

S'agissant de l'impact de la 5G proprement dite, on peut lister tout un ensemble d'effets contradictoires appartenant à des domaines très différents :

Les éléments à charge

Un point négatif potentiel souligné dans de nombreuses études est l'effet rebond : l'augmentation des capacités conduira naturellement à une augmentation des usages. Par exemple, une croissance inconsidérée de la vidéo à la demande et l'augmentation de la résolution de ces vidéos risquent de conduire à un accroissement de la consommation énergétique des réseaux cellulaires malgré l'amélioration de la dépense énergétique pour un service donné. Mais le point le plus négatif est celui du coût environnemental de la production des terminaux mobiles (serveurs, stations de travail, tablettes, *smartphones*, objets connectés). Dans « Chiffres clés du climat, 2021 » du ministère de la Transition écologique, il est noté page 83 que la fabrication d'un appareil de type *smartphone* dégage 30 kg de CO₂. Pour 30 millions de *smartphones*, cela correspond à 0,9 MtCO₂ (mégatonnes de CO₂). Ce chiffre est à comparer par exemple aux 662 MtCO₂ émis en France (en incluant les émissions associées aux importations). L'impact environnemental des terminaux dépasse toutefois celui de l'émission de gaz à effet de serre lors de leur production : il faut également prendre en compte la consommation de ressources

abiotiques (eau, minéraux, terres rares, éléments de batteries, etc.). Ce point est d'autant plus important que les consommateurs changent de smartphone approximativement tous les deux ans en France et que le passage à la 5G est, de fait, une incitation à changer plus vite de *smartphone*.

Chaque nouvelle technologie cellulaire s'ajoute aux précédentes qui perdurent, et cette accumulation conduit à une accumulation d'impacts sur l'environnement. Des réflexions pour arrêter la 3G ou la 2G sont à l'étude, mais ceci n'est pas envisageable dans un futur proche.

Les éléments à mieux comprendre

Les antennes 5G en forme de tableaux de petites antennes élémentaires demandent davantage de calcul pour déterminer ce que chaque antenne élémentaire doit émettre pour obtenir la focalisation globale désirée. Les auteurs du rapport n'ont pas actuellement l'information suffisante pour évaluer ce coût énergétique ; une estimation précise est à faire tant pour la bande des 3,5 GHz que pour les ondes millimétriques.

Comme déjà souligné, la 5G ne se substitue pas aux générations précédentes et conduit donc à des dépenses énergétiques et environnementales supplémentaires, par exemple dans le domaine de la fabrication de nouvelles stations de base et de terminaux. Toutefois, une densification de la 4G nécessiterait elle aussi la fabrication et l'installation de nouvelles stations de base moins efficaces. Si la 5G peut conduire à une augmentation de la consommation d'énergie par effet de rebond, son non-déploiement conduit aussi à une augmentation par une utilisation croissante d'une 4G plus énergivore et parfois saturée.

Un autre point à mieux comprendre est celui de l'évolution de la dépense énergétique engendrée à terme par le développement du *multiaccess edge computing* (MEC, cf. Question 3). Il y a là aussi deux effets contradictoires : un effet négatif dû à la multiplication des ressources de calcul et de stockage et à celle des services en périphérie de réseau ; mais aussi un effet positif dû à une plus grande localité dans la transmission des données, qui réduit les coûts énergétiques.

Les éléments positifs

Un effet positif fondamental vient de la forte réduction de l'angle d'émission des communications qui est à la base de cette nouvelle génération de réseaux : pour un service donné, la dépense d'énergie directement due à l'émission d'ondes sera bien inférieure avec la 5G qu'avec les générations précédentes. Un autre effet positif réside dans la nouvelle fonctionnalité de mise en veille de ces stations en cas de non-utilisation (par exemple la nuit), suivie d'un redémarrage aussi très rapide.

D'après les équipementiers, le gain énergétique à service comparable sera de 2 dans la phase initiale du déploiement de la 5G et pourrait atteindre 20 à terme, une fois mises en œuvre toutes les adaptations et optimisations prévues. S'il est difficile d'estimer exactement quel sera ce gain futur, il semble qu'il sera de toute façon conséquent.

Il y a aussi des perspectives complémentaires pour réduire la dépense énergétique actuelle, au niveau des circuits et des architectures de calcul, du monitoring, des bonnes pratiques de développement, etc. La croissance annoncée des usages et des marchés rend leur mise en œuvre essentielle. Par exemple, la focalisation elle-même demande l'activation de circuits électroniques et des calculs en temps réel qui sont consommateurs d'énergie. D'où l'idée de n'utiliser les

techniques de focalisation que dans les cas de fort trafic, d'éteindre les équipements inactifs, etc. De manière plus générale, les techniciens et chercheurs des réseaux se sont attachés à réaliser tout un ensemble d'économies d'énergies dans les réseaux de communications et les *data centers* pour en réduire les coûts de fonctionnement. Il convient de continuer à porter une grande attention à la question de la réduction des effets sur l'environnement, ce dès les premières phases de conception de nouveaux services, applications ou produits (écoconception). Ces efforts ont conduit et vont continuer à réduire la dépense énergétique de ces systèmes et à contrebalancer, au moins en partie, la croissance des usages annoncée.

Les externalités positives

Dans ce contexte, on appelle externalités positives les réductions de dépenses énergétiques rendues possibles dans d'autres domaines par l'utilisation et l'amélioration des télécommunications. Ces externalités positives forment un argument majeur pour contrebalancer les effets négatifs sur l'environnement. Nous donnons ici deux exemples.

Une visioconférence permet d'éviter les déplacements des participants, indispensables pour les réunions en présentiel. Pour évaluer correctement le bilan carbone d'une telle réunion, il faut donc considérer non seulement celui des équipements et de la dépense en énergie électrique qui la rendent possible, mais aussi celui des déplacements évités.

La composante Internet des objets des futures générations de réseaux devrait permettre diverses formes d'adaptation, de contrôle et de réduction de la dépense énergétique dans des domaines aussi divers que la production industrielle, la mobilité, la domotique, la santé, l'agriculture, etc. Cette introduction d'une nouvelle forme d'intelligence et d'optimisation locale dans les processus en question, qui sont parmi les plus dépensiers en énergie. Selon les partenaires du projet européen H2020 Pixel, qui porte sur la gestion d'infrastructures portuaires, l'introduction d'un contrôle fondé sur les communications mobiles et l'Internet des objets pourrait conduire à une réduction de l'ordre de 20% de la dépense énergétique et des émissions polluantes associées.

Si les effets directs du numérique et des réseaux sont déjà difficiles à estimer, leurs effets indirects (tant positifs que négatifs) sont encore moins connus. De nombreux travaux académiques ou rapports d'organisations ont avancé des estimations, mais en parvenant à des conclusions radicalement différentes. Les différences peuvent s'expliquer par la nature des sources de données les méthodologies d'analyse. Dans certains travaux, le numérique a été présenté comme une menace majeure responsable de 10% des émissions mondiales de gaz à effet de serre dans quelques années, ainsi que de l'accélération de l'extraction et de l'utilisation des combustibles fossiles et terres rares. Dans d'autres travaux, le numérique est présenté comme une solution extrêmement vertueuse, permettant de réduire de 15% et plus les émissions globales de gaz à effet de serre du fait des externalités positives. Par exemple, selon le rapport *Mobile Carbon Impact* du GeSi, la réduction des émissions de carbone permise par la 4G aurait été en 2016 environ cinq fois supérieure aux émissions de carbone associées au réseau, alors que d'autres études donnent de tout autres estimations.

Bien utilisés, les réseaux du futur peuvent devenir un atout clé pour l'économie et pour la transition écologique. Il est toutefois essentiel de mettre au point des méthodes rigoureuses pour quantifier les externalités en question et pour identifier les principaux leviers permettant de maximiser les avantages potentiels des nouvelles générations de réseaux tout en minimisant les risques.

5.7.3. Craintes du public et autres objections liées à la question 7

Les objections fondées sur le coût environnemental de la fabrication des terminaux (smartphones, tablettes, ordinateurs) sont justifiées. Des travaux pour quantifier les impacts environnementaux du numérique sont menés conjointement par l'Ademe et l'Arcep. Comme la fabrication des terminaux tient une place importante dans ces coûts, l'augmentation de la durée de vie et le reconditionnement d'un smartphone sont des réponses naturelles (voir la société française Back Market). Il est par exemple important dans ce contexte de choisir le fabricant qui propose la durée de vie la plus longue et la meilleure réparabilité. Une deuxième réponse naturelle est la réutilisation et le recyclage des terminaux. Ce sont déjà des réalités économiques, mais il convient de les développer et de les renforcer. À noter dans ce cadre les belles réalisations de la société néerlandaise Fairphone, qui produit des smartphones modulaires et réparables.

La généralisation de la 5G va effectivement conduire à un remplacement progressif des terminaux, à un rythme encore non connu. On peut cependant relever un point évident : les *smartphones* actuels seront de toute façon remplacés dans l'avenir, et probablement par des appareils à durée de vie plus grande. Dans les générations précédentes, les capacités de calcul et de stockage étaient souvent insuffisantes pour les besoins des nouvelles applications, ce qui contribuait au changement rapide. Maintenant, ce n'est plus vrai car les *smartphones* sont devenus ultrapuissants. Le véritable enjeu est donc bien d'allonger la durée de vie des téléphones.

Les densités d'objets connectés envisagées (un million par kilomètre carré en milieu urbain ou industriel) justifient aussi les interrogations de nature environnementales relatives au déploiement de ces objets.

L'impact environnemental du déploiement des stations de base 5G doit être distingué de l'impact des ondes sur la santé, qui est abordé dans la question 8. Dans la phase actuelle, celle du déploiement de la 5G sur la bande 3,5 GHz, le coût environnemental est essentiellement celui de la fabrication et de l'opération des stations de base de la 5G, car des dernières sont ou seront le plus souvent installées sur les mêmes supports (mâts) que celles de la 4G. Mais, lorsqu'elles utilisent intensivement la focalisation par coordination des éléments d'antenne, ces stations de base ont beaucoup de calculs à effectuer avec des ressources spécifiques à fabriquer et à alimenter. De plus, ces questions devront être soigneusement réexaminées avant le déploiement des stations de base utilisant les ondes millimétriques, car les composants électroniques dans ces gammes de fréquences sont plus consommateurs d'énergie puisque la portée est moindre, ce qui nécessitera un déploiement plus dense.

Bien avant son déploiement, l'arrivée de la 5G a soulevé la crainte qu'elle pourrait conduire à une explosion de la consommation énergétique des réseaux cellulaires. Un accroissement est possible en dépit de la plus grande sobriété de la technologie, notamment par effet de rebond. La maîtrise de la croissance de la consommation énergétique des réseaux passe en partie importante par la maîtrise de la croissance du trafic et donc par l'éducation : chacun devrait savoir qu'il vaut mieux utiliser le filaire ou le WiFi plutôt que le cellulaire quand c'est possible, la fibre offrant des performances meilleures que la 5G et consommant un ordre de grandeur moins d'énergie ; il serait utile aussi que chacun ait connaissance du coût énergétique des jeux en ligne, de la vidéo en ligne, etc. Cet aspect éducatif pourrait être complété si nécessaire par des réglementations ou des tarifications appropriées.

Une autre objection est que tout accroissement même faible de la dépense énergétique des réseaux cellulaires est incompatible avec les ambitions de réduction globale de la dépense énergétique (accords de Paris par exemple). Toute analyse sur ce point de politique publique devra prendre en compte les ordres de grandeurs et les coûts évoqués ci-dessus, ainsi que des évaluations précises des externalités positives des réseaux cellulaires qui sont essentielles dans ce contexte. Un autre élément important est le fait que l'alternative au déploiement de la 5G est la densification de la 4G, qui serait à terme une plus mauvaise solution du point de vue tant de la dépense énergétique que du service rendu.

5.8. Question 8 : les impacts des réseaux sur la santé

Quel est l'état des connaissances sur les effets de ces réseaux sur la santé ?

Références : [An21], [Au17], [CG20], [Ie17], [TF17].

5.8.1. Les deux impacts potentiels

Cette question a plusieurs volets. Nous nous concentrons ici sur le plus débattu d'entre eux qui est celui de l'effet des ondes électromagnétiques sur la santé. Nous abordons aussi un autre volet important qui est celui du caractère potentiellement addictif de ces technologies. En contrepartie de ces deux volets négatifs, il convient de rappeler que les réseaux cellulaires permettent aussi de sauver des vies humaines par les capacités qu'ils offrent pour appeler au secours ou déclencher des interventions d'urgence en tout temps et en tout lieu couvert par le réseau. Ils jouent par ailleurs un rôle majeur dans la vie sociale, et donc dans la santé globale. Il est à noter que ces volets sont génériques et dépassent largement le cadre de la 5G.

5.8.2. L'impact des ondes sur la santé

Cet impact fait l'objet de nombreuses études sur le plan international (OMS) et dans la plupart des pays, mais les auteurs de ce rapport n'ont pas les compétences nécessaires pour y apporter des observations nouvelles.

La France a un bon niveau d'activité sur ces questions. On peut notamment s'appuyer sur les rapports de l'Agence nationale de contrôle sanitaire et environnemental des produits (l'Ancsep), qui dispose de budgets liés à la taxe sur les installations électriques, et de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Ces questions sont aussi suivies par l'Agence nationale des fréquences (Anfr) et l'Académie nationale de médecine. L'action des agences dans le domaine des réseaux est coordonnée par le 4^e plan santé-environnement.

Lors de l'émission par un téléphone, une partie de l'énergie transportée par les ondes électromagnétiques est absorbée par le corps humain. Pour quantifier cet effet, la mesure de référence est le débit d'absorption spécifique (DAS), pour toutes les ondes comprises entre 100 kHz et 10 GHz. Le DAS s'exprime en Watt par kilogramme (W/kg). Les normes de DAS sont définies au niveau européen. Les mesures du DAS des *smartphones* commercialisés sont publiées par l'Agence nationale des fréquences (Anfr).

En ce qui concerne les ondes émises par la station de base, la notion pertinente est la puissance

reçue par unité de surface, qui est spécifiée par des normes internationales qui sont rendues plus strictes en France [CG20].

On doit distinguer deux types de questions : celles liées aux nouvelles bandes de fréquences en dessous de 6 GHz, qui sont en cours de déploiement en France dans le cadre de la 5G, et pour lesquelles la communauté scientifique a beaucoup de recul, et celles liées à l'utilisation future des ondes millimétriques dont on connaît moins les effets dans le cadre d'une utilisation grand public.

Pour les bandes en dessous de 6 GHz, la communauté scientifique a étudié depuis longtemps les effets thermiques instantanés. Ces effets sont les seuls avérés et répliquables. Les normes de puissance sont donc définies en fonction de ces effets thermiques. L'exposition résultant de la voie montante, c'est-à-dire liée à l'émission par un terminal mobile, est de manière générale bien plus importante que celle résultant de la voie descendante, c'est-à-dire liée à celle des antennes des stations de base : 10 minutes d'exposition sur la voie montante correspondent à un mois d'exposition sur la voie descendante depuis ces antennes, d'où l'importance de la mesure rigoureuse du DAS des *smartphones* mentionnés ci-dessus. Pour les effets à long terme de la voie montante, nous avons beaucoup de recul grâce aux études menées depuis les années 1990. S'il y avait par exemple une incidence de l'exposition sur la voie montante sur les tumeurs du cerveau, ceci serait observable aujourd'hui au vu de l'explosion de l'utilisation intensive des communications mobiles depuis des décennies. Or, on n'observe pas d'augmentation de la fréquence des tumeurs du cerveau ou de l'oreille à laquelle est appliqué le téléphone portable. Des études épidémiologiques ont aussi tenté de lier l'occurrence de certains types de cancers à l'exposition aux ondes électromagnétiques, par exemple en interrogeant des patients atteints de tumeurs du cerveau sur leur utilisation des communications mobiles. Aucune d'entre elles n'a apporté de preuve d'une relation de cause à effet. Mais ces études épidémiologiques sont complexes à conduire et à interpréter car l'exposition est très liée à l'usage et à certains gestes d'utilisation : l'exposition la plus forte est celle où le téléphone est collé contre l'oreille. Un effort de formation est nécessaire dans ce domaine.

Pour les bandes de fréquences en dessous de 6 GHz, il y a toutefois une nouveauté importante dans les normes de la 5G par rapport aux générations précédentes, qui est celle de la focalisation. Pour le 3.5 GHz par exemple, la focalisation donnera des faisceaux de quelques degrés, soit quelques dizaines de mètres autour du mobile pour les cellules typiques. Sur la voie descendante (de la station de base vers un mobile donné), cela donnera un champ incident plus élevé sur des durées courtes au moment des communications mais une moyenne d'exposition dans le temps probablement bien inférieure, ce qu'il faudrait confirmer par suffisamment de mesures continues dès la phase de déploiement. La raison fondamentale est que l'exposition collatérale, due aux champs induits par les autres communications en cours sur la voie descendante, sera bien plus faible grâce à la focalisation. La focalisation devrait donc conduire à une baisse de l'exposition totale pour un service donné. Aux niveaux considérés, l'augmentation de la variabilité n'a pas d'effet d'après les experts. L'Agence nationale des fréquences (Anfr) a été chargée de mener une étude et un rapport préliminaire a été rendu en 2020 à l'Anses. Ces arguments suggèrent que les radiofréquences de la 5G utilisées maintenant en France ne devraient pas présenter davantage de dangers que celles utilisées par les générations précédentes. Dans ses actualités du 20/04/2021, l'Anses considère comme « peu probable que le déploiement de la 5G dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz constitue

à l'heure actuelle de nouveaux risques pour la santé » [An21]. Plusieurs questions importantes restent toutefois ouvertes à notre sens. Le recul que nous avons ne peut pas par nature prendre en compte l'augmentation et la transformation des usages qui sont constatées actuellement, encore moins des futurs. Nous n'avons pas de recul non plus sur l'effet de l'utilisation simultanée de plusieurs bandes de fréquence (par exemple bandes 4G et bande 3,5 GHz de la 5G, ou encore à terme bandes millimétriques et bande 3.5 GHz).

Dans le futur, les ondes millimétriques seront aussi utilisées par la 5G. Ces ondes sont fortement absorbées par les tissus externes du corps humain. Les organes et notamment le cerveau devraient donc être normalement protégés de ce type d'ondes par ces tissus externes. L'effet de l'utilisation des ondes millimétriques émises près des personnes sera toutefois une nouveauté qui demande des études complémentaires. On pense cependant que ces bandes de fréquences seront utilisées dans un premier temps en robotique, dans le domaine de la production industrielle et dans le domaine des communications entre véhicules. Dans le contexte industriel, les normes d'exposition font l'objet de réglementations spécifiques différentes de celles en vigueur pour le public. Dans ses actualités du 20/04/2021, l'Anses considère aussi que « les données ne sont pas suffisantes pour conclure à l'existence ou non d'effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans la bande 26 GHz » [An21].

5.8.3. Craintes du public liées à la question 8

Craintes liées aux ondes

Il est clair que nous n'avons pas dans le domaine des ondes millimétriques le recul procuré par 30 ans d'utilisation massive des radiofréquences inférieures à 6 GHz. Dans ce domaine, des études avant déploiement sont impératives pour améliorer notre compréhension des effets d'une utilisation des ondes millimétriques sur les personnes en milieu industriel et en communications mobiles grand public, puisque ceci est aussi envisagé à terme.

Par ailleurs, outre ceux déjà mentionnés concernant les aspects cumulatifs, les points suivants sont eux aussi encore mal connus et demandent des études complémentaires :

- l'effet d'une utilisation prolongée du mode données par les jeunes enfants, qui est un phénomène nouveau sur lequel la communauté scientifique n'a pas non plus le recul souhaitable ;
- l'hypersensibilité électromagnétique, dont les symptômes sont étudiés par l'OMS ou encore l'Académie de médecine.

Craintes liées à l'addiction au numérique

Une autre crainte est celle de l'exacerbation par la 5G des maux associés à Internet : capture de l'attention, addiction, et rôle accru de la réalité virtuelle, qui peut rendre à la fois plus attractives, donc plus addictives, les interactions à distance. Même si elles ont plus trait au numérique dans son ensemble qu'à la 5G proprement dite, ces craintes sont justifiées. Ces sujets font l'objet de nombreuses études et de certaines interventions dans le cadre scolaire par exemple, avec tout un ensemble d'autres recommandations sur les bonnes pratiques individuelles dans ce domaine.

Un autre point à noter est la toxicité potentielle de la lumière émise par le terminal portable notamment la lumière bleue. Au-delà de la fatigue que peut créer cette lumière, surtout le soir,

elle pourrait avoir une forme de toxicité sur les cellules rétiniennes. À noter que ces observations sont génériques et que rien ne distingue sur ce point un smartphone 5G d'un smartphone 4G.

5.9. Question 9 : les enjeux de souveraineté

Quels sont les enjeux de souveraineté française ou européenne ?

Quelles sont les questions de sécurité spécifiques liées aux dépendances envers les équipements et logiciels des nouvelles générations de réseaux cellulaires ?

Références : [5E16].

5.9.1. Les communications cellulaires sont stratégiques

Il ressort clairement des réponses aux questions précédentes que le secteur des réseaux cellulaires doit être considéré comme stratégique, ne serait-ce qu'à cause de l'impact que les nouvelles générations de réseaux auront à terme sur le public, la production industrielle, la mobilité et les services.

Mais le cyberspace devient une zone de conflit de première importance. Un point clef en matière de cybersécurité est celui de la résilience dans le contexte de l'utilisation de la 5G pour les systèmes critiques. Il ne faut pas qu'un adversaire puisse éteindre le réseau qui contrôle un tel système et le paralyser par ce biais. En France, le gouvernement homologue les équipements utilisés par les opérateurs (Orange, Free, SFR, Bouygues). Initialement, cette volonté d'homologation venait de la crainte de l'écoute des conversations téléphoniques. Au-delà des inquiétudes associées à l'existence de porte dérobées (*backdoors*) permettant un espionnage très discret par les circuits et les logiciels de base (voir l'encadré sur la sécurité), c'est le souci de résilience des réseaux qui dominera dans le futur.

5.9.2. La sécurité informatique

Le niveau de sécurité s'améliore de génération en génération grâce au travail des chercheurs et des industriels. Toutefois, des difficultés nouvelles apparaissent dans le cadre de la 5G du fait de la virtualisation et du déport d'une partie de l'intelligence, qui se déplace du cœur du réseau vers sa périphérie. La taille du logiciel augmentant considérablement, la surface d'attaque sera plus grande. En particulier, la virtualisation qui va être au cœur de l'évolution de la 5G dans le futur, offrira de nouvelles opportunités mais posera aussi un ensemble de nouveaux défis en termes de sécurité, probablement similaires cependant à ceux déjà connus dans le *cloud computing* actuel.

Un point à surveiller tout particulièrement est la sécurité informatique des objets informatisés très variés (de la domotique au transport et à la médecine, en passant par l'outillage), pour lesquels la compétence industrielle sur ce sujet reste bien trop limitée dans les industries classiques. Ceci pourrait devenir un frein sérieux pour le développement de ce domaine essentiel pour les applications futures. La sécurité dans ce cadre dépend de trois aspects (voir aussi l'encadré dédié) :

- d'abord, la sécurité des protocoles de communications dans les réseaux, qui reste un point délicat, en particulier pour la connexion des objets, mais même pour le bien connu https du web ;

- ensuite, la difficulté d'utiliser certaines opérations cryptographiques avec un niveau de sécurité élevé (comme les protocoles à base d'échanges de clés) dans les objets à basse consommation énergétique (fonctionnant sur piles par exemple, voire tirant leur énergie de l'environnement extérieur par leur mouvement) ;
- enfin la détection d'intrusions, déjà traitée dans les cœurs de réseau en faisant souvent appel à des algorithmes d'intelligence artificielle, mais qui reste difficile, à cause du nombre et des capacités scientifiques et techniques des attaquants ; cette détection, qui doit être rapide, n'est presque jamais présente sur les objets connectés individuels, faute de puissance de calcul et de taille mémoire.

Réseaux cellulaires et sécurité informatique

La sécurité informatique concerne la protection des données et systèmes des utilisateurs privés, des systèmes d'information en tous genre (entreprises, états, organisations bénévoles, etc.), et, ce qu'on oublie trop souvent, des données et comportements des systèmes cyberphysiques, c'est à dire des objets, machines et systèmes du monde physique surveillés ou contrôlés par des circuits et logiciels, dont le nombre augmente très vite. Beaucoup de ces derniers sont critiques pour la sécurité physique des biens et des personnes : de bons exemples sont les réseaux électriques, les réseaux de communications et les usines, qui sont des domaines d'usage visés directement par le 5G et les réseaux ultérieurs.

Les attaques sont très variées et de plus en plus fréquentes, et le plus souvent effectuées par réseau : pistage des utilisateurs, hameçonnage, vols ou modifications de données mal protégées, cryptage de données par rançongiciels, modification de paramètres ou même de programmes des objets et machines, dénis de service en rendant les connexions impossibles, etc. Les points d'entrée sont variés : cassage de mots de passe, exploitations de failles dans la cryptographie ou de bugs dans les protocoles de communications, systèmes d'exploitation ou applications, corruptions de mises à jour, brouillage des réseaux, utilisation de canaux cachés variés (par exemple par analyse de la consommation énergétique des calculs pour casser des clefs de chiffrement), etc. Des kits d'attaque sophistiqués sont disponibles sur le dark web et utilisés par les pirates (individus, mafias, gouvernements, ...).

Une méthode d'attaque particulièrement sournoise car très difficile à détecter est l'installation de portes dérobées (*backdoors*) dans les logiciels de base ou dans les matériels, par exemple par les constructeurs ou des États. De telles portes dérobées peuvent permettre d'observer ce qui se passe sur les réseaux, ou encore de les rendre inopérants. S'assurer de leur absence est donc indispensable, mais très difficile si elles se trouvent dans les circuits eux-mêmes. C'est une des raisons de la méfiance des autorités américaines ou européennes vis-à-vis de constructeurs sur lesquels ils n'ont pas de contrôle direct.

Ce contexte impose d'étudier très sérieusement les protections et méthodes de détection, sujets hautement scientifiques et techniquement délicats. Les protections sont fournies par le chiffrement, à base mathématique, les protocoles de sécurité servant par exemple à échanger les clefs de chiffrement (le protocole SSL/TLS utilisé par https en est un exemple

pour Internet), les coffres-forts à mots de passe, et l'ensemble des moyens de détection d'attaques : antivirus et détecteurs de malwares, analyseurs de trafic réseau, etc. Les points de faiblesse sont soit du côté des utilisateurs soit de celui des systèmes : mots de passe faibles, réponse à l'hameçonnage, logiciels pas mis à jour lors de leurs corrections de failles, utilisation de systèmes obsolètes ou récents mais mal protégés (encore fréquents dans les objets), etc.

En France, l'Anssi, très compétente, joue un rôle essentiel dans la protection des systèmes publics et dans l'analyse d'attaques et de systèmes de protection en général. L'industrie de la protection grandit vite, mais le sujet est difficile et demande une formation très sérieuse de nombreux spécialistes, les recettes de base classiques ne suffisant plus car les attaques deviennent très sophistiquées. Des initiatives dans ce sens sont actuellement mises en place.

5.9.3. La souveraineté

La question de la souveraineté dans ce secteur n'a aujourd'hui de sens qu'au niveau européen. Elle a trois grands volets : la souveraineté dans le domaine des matériels (terminaux, stations de base, antennes), celle dans le domaine des données, au-delà des données échangées par les utilisateurs (données de géolocalisation, données collectées par des capteurs et des actuateurs) et enfin celle dans le domaine des systèmes (système de contrôle du réseau proprement dit, systèmes en silo pour les divers types de secteurs industriels décrits dans les questions précédentes, logiciels associés).

Pour le premier volet, la situation est déjà celle d'une grande dépendance, conséquence du fait que l'Europe est hors-jeu dans le domaine des circuits à gravure ultrafine (5 puis 3nm) Elle met en place maintenant de grands projets de réindustrialisation dans ce domaine, mais leurs effets ne pourront pas être rapides, vu la difficulté et le coût. Le corollaire immédiat est qu'il en va de même dans le domaine des terminaux mobiles.

La situation est meilleure pour les stations de base, grâce à Nokia et Ericsson, ou pour les circuits embarqués dans les systèmes cyber physiques, grâce à ST Microelectronics qui maîtrise bien la création et la production rapide de systèmes sur puces dédiés à ces applications, par exemple en automobile et autres objets industriels de grande consommation. Ces circuits ne nécessitent pas les gravures ultrafines et peuvent être fabriqués en Europe.

Dans le domaine des données, les services de type *edge computing* pourraient conduire à de nouveaux modes d'intrusion dans la vie privée et de surveillance des individus. Un cadre juridique approprié sera nécessaire si l'on veut éviter une situation de type GAFAM dans ces domaines encore ouverts. Une dépendance à terme dans le domaine des systèmes logiciels serait la plus lourde de conséquences : comment accepter en connaissance de cause que les logiciels qui organiseront les communications internes de systèmes critiques pour la production industrielle, le transport de l'énergie et la mobilité des individus ne soient plus ni conçus ni contrôlés par des acteurs européens ?

5.9.4. Le besoin d'une stratégie française et européenne

En France, la compétence dans ce domaine, très forte dans les années 1990 comme nous l'avons dit précédemment, s'est étiolée au cours du temps, à la fois dans la recherche et dans l'industrie. Un bon témoin est la faiblesse des appels actuels de l'ANR sur ce sujet. Étant donnés les enjeux scientifiques et techniques associés, ainsi que les craintes à propos du tissu industriel dans ce domaine très technique, nous pensons qu'il est nécessaire de reconstruire une compétence de recherche scientifique indépendante et visant le long terme afin d'éclairer les choix futurs sur tous les aspects traités dans ce rapport.

De même, il manque encore clairement une stratégie européenne qui prenne en compte les points forts que nous avons, notamment la présence de deux constructeurs de stature mondiale (Nokia et Ericsson) et d'opérateurs compétents, ainsi que les points faibles, notamment dans le domaine des circuits et des services. Cette stratégie doit prendre en compte le fait que la compétition actuelle entre les constructeurs n'est pas équitable, dans la mesure où certains constructeurs étrangers sont fortement subventionnés de manière étatique alors que d'autres ne le sont pas. La souveraineté digitale de l'Europe passe par la pérennité et le soutien des deux acteurs restants. Il convient donc de soutenir l'effort actuel d'identification par la Commission européenne d'une liste de secteurs critiques pour lesquels il est impératif de dépasser les lois du marché sous leurs formes actuelles et de recommander une intervention de la puissance publique. Les premiers secteurs identifiés sont l'aéronautique, le spatial et la défense (discours du Commissaire Thierry Breton du 21 février 2021) ; il est urgent d'y ajouter les télécommunications.

5.9.5. Craintes du public et autres objections liées à la question 9

Une première crainte est celle d'une surveillance de masse. Ceci est un vrai problème potentiel, tant sous la forme de la surveillance par l'employeur ou par des entreprises, voire par des organisations malveillantes, que sous la forme de la surveillance par des États qui espionneraient à terme les citoyens hors de tout cadre légal au moyen des réseaux. L'amélioration de la localisation permise par la 5G et une utilisation détournée du edge computing et de l'IA (cf. Question 3) donnent une dimension potentiellement nouvelle à ces questions, quant à la vidéo-surveillance par exemple.

Mais nous avons en Europe et en France des institutions qui prennent ce danger en compte. Le Règlement général sur la protection des données (RGPD) s'occupe activement du sujet au moins pour les organismes publics et les entreprises légales. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil) et l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi) également. Le droit du travail s'applique pour ce qui concerne les relations entre employés et employeurs dans le contexte du télétravail. Il convient de soutenir les actions de ces institutions et de faire comprendre que leur action est justifiée. Mais il faut surtout remédier à l'absence d'éducation et de formation des citoyens dans ces domaines. Il faut aussi leur donner les moyens de mieux contrôler l'exposition de leurs données.

Un autre danger est celui de la dépendance à l'égard des GAFAM du présent et du futur. Ce problème est déjà très réel. Il est exacerbé par le fait qu'aucun des plus grands acteurs industriels qui se développent dans le domaine des services numériques n'est européen. Google et Facebook utilisent déjà les informations de géolocalisation et bien d'autres informations personnelles pour proposer des services (commerces, restaurants) dans le périmètre actuel de

l'utilisateur. Amazon est déjà devenu plus performant que le commerce de proximité même s'il ne contrôle actuellement que l'accès à l'information obtenue par le navigateur ou l'application de l'utilisateur. Il pourrait le devenir encore davantage car il évolue maintenant vers le contrôle de la logistique et de la grande distribution. Qu'en sera-t-il demain lorsqu'Amazon ou son alter-ego contrôleront l'information géolocalisée ? Il convient d'encourager la recherche dans les services informatiques et le développement de nouvelles pousses offrant des services plus respectueux de l'utilisateur, notamment dans le cadre du calcul en périphérie de réseau, qui offre un potentiel inexploré. Il convient aussi de soutenir les initiatives dans ce domaine et de faire progresser le niveau de compréhension de ces sujets et des risques associés chez les décideurs et dans le public.

Pour la sécurité informatique, il y a deux grandes classes de risques, déjà présents dans les systèmes actuels : le piratage des données et des communications d'une part, les attaques sur les systèmes (usines, hôpitaux, réseaux d'énergie, etc.) d'autre part. Les cyberattaques sont en forte augmentation, par de plus en plus de portes d'entrée et avec de plus en plus de moyens, très professionnels. Les réseaux dans leur ensemble offrent un angle d'attaque par eux-mêmes. De plus, toutes les attaques sur les équipements passent par eux. Il n'est pas encore clair que la 5G puisse apporter un plus en termes de sécurité des communications par rapport aux générations précédentes. Elle pourrait même amplifier ces problèmes à cause de l'augmentation de son périmètre et des débits de données piratables.

Une autre interrogation justifiée concerne le contrôle en temps réel d'infrastructures critiques par la 5G. Comment ce type de contrôle résistera-t-il à des attaques par brouillage (émission de bruit de forte puissance sur les bandes de fréquences utilisées pour les communications) ? Des réponses à ces dernières questions seront essentielles avant le déploiement de la 5G dans les infrastructures critiques, et nécessiteront un effort de recherche massif.

En ce qui concerne ces questions, il faut souligner le rôle essentiel de l'Anssi en France, qui dispose d'une grande compétence technique et administrative. L'Anssi homologue déjà les équipements de cœur de réseau et les stations de base et protège donc d'une mainmise d'attaquants potentiels sur le cœur du système. Elle donne aussi des indications précises aux utilisateurs pour améliorer leur sécurité.

En résumé, de manière générale, les craintes liées à la 5G dans le domaine de la sécurité et de la surveillance informatique des personnes, des institutions et des entreprises, ainsi que dans le domaine de souveraineté de l'État sont entièrement justifiées. Les seules réponses possibles sont un renforcement du rôle des agences telles que l'Anssi et du cadre réglementaire déjà entamé avec le RGPD, et appelé à se poursuivre avec, notamment, le Digital Market Act européen en cours d'élaboration. Toutefois, tout ceci exige aussi que nous gardions en Europe une maîtrise scientifique et industrielle, ce qui demandera un accroissement important de l'effort de R&D sur ces questions, un soutien fort aux industriels du domaine, et une véritable vision sur le long terme.

Remerciements

Les membres du groupe de travail remercient les personnes auditionnées ainsi que les personnes suivantes pour leurs apports à ce document :

Jean-Francois Bach (Académie des sciences),
Godefroy Beauvallet (Conseil général de l'économie),
Thierry Bonhomme (Académie des technologies),
Pierre Corvol (Académie des sciences),
Jean-Marie Gorce (Inria),
Daniel Kofman (Télécom Paris),
Jean-Paul Laumond (Académie des sciences),
Odile Macchi (Académie des sciences),
Olivier Pironneau (Académie des sciences),
Didier Roux (Académie des sciences)
Jean Salençon (Académie des sciences).

Bibliographie

- [Ac21] *The Impact of 5G on the European Economy*. Accenture Strategy. White paper (2021).
https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-144/Accenture-5G-WP-EU-Feb26.pdf.
- [An21] *Actualités du 20/04/2021*. Anses, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (2021).
<https://www.anses.fr/fr/content/5g-pas-de-risques-nouveaux-pour-la-sant%C3%A9-au-vu-des-donn%C3%A9es-disponibles>.
- [Ar20] *Rapports d'activité de l'Arcep (2020)*.
https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/ARC-RA2020-TOME1-juillet2020.pdf.
https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-TC-2020-avril2020.pdf.
https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-etat-internet_edition-2020_250620.pdf.
- [Ar21] *Les services de communications électroniques en France, 4e trimestre 2020*. Arcep, Observatoire des marchés des communications électroniques (2021).
https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1621504767/reprise/observatoire/4-2020/obs-marches-t4-2020_090421.pdf.
- [AS20] Akbarzadeh S., Schwoerer J., Bailly B. & Labidi W. (2020). *Les réseaux 5G : Architecture système, radio et cœur, coexistence 4G, mise en œuvre opérationnelle*. Éditions Eyrolles.
- [Au17] A. Aurengo, *Exposition aux ondes électromagnétiques*. Académie Nationale de Médecine (2017)
- [CG20] *Déploiement de la 5G : en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires*, CGEDD, Conseil général de l'économie et du développement durable (2020).
<https://www.economie.gouv.fr/cge/deploiement-5G>.
<https://duckduckgo.com/?q=coffre-fort+pluriel&t=newext&atb=v246-1&ia=web>
- [CN20] *Livre blanc 5G : Stratégies et enjeux*. Conseil National de l'Industrie – Comité stratégique de filière Infrastructure numériques (2020).
https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files_cni/files/actualite/livre_blanc_5g_strategie_et_enjeux.pdf.
- [Di19] Di Renzo M. et al. *Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable AI Meta-surfaces: An Idea Whose Time Has Come*. EURASIP J. Wireless Communication. Networks, vol. 129, pp. 1-20 (2019).
- [En20] Enescu M. *5G New Radio: A Beam-Based Air Interface*. Wiley Editions (2020).
- [Es20] *Programmes ARTES*. Esa (2020).
<https://artes.esa.int/>.
<https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/space-economy-report/>.
- [Ge16] *GeSi Mobile Carbon Impact*. rapport GeSi (2016).
<https://www.gesi.org/research/gesi-mobile-carbon-impact>.

- [He21] 6G Vision, use cases and key societal values. Programme européen Hexa-X (2021). https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2021/02/Hexa-X_D1.1.pdf.
- [HT19] Holma H. et Toskala A. (2019). *5G Technology: 3GPP New Radio*. Wiley Editions.
- [Ie17] *Determination of RF Field Strength and SAR in the Vicinity of Radio Communication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure*. IEC Report 62232 (2017). <https://www.emf-portal.org/en/article/38267>.
- [Jo19] Johnson C (2019). *5G New Radio in Bullets*. Independently published.
- [Ma10] Marzetta T.L. (2010). *Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas*. IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600.
- [NG21] 6G, *Drivers and vision*. NGNM (2021). https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Drivers-and-Vision-V1.0_final.pdf
- [NG15] *NGMN 5G White Paper*. NGNM (2015). <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper.html>.
- [Or21] *Operator Defined Open and Intelligent Radio Access Networks*. O-RAN Alliance. <https://www.o-ran.org/>.
- [Pw21] PwC, *The global economic impact of 5G*, 2021. <https://www.pwc.com/gx/en/about/contribution-to-debate/world-economic-forum/the-impact-of-5g.html>.
- [SI19] *Satellite Industry Association Report 2021*. Satellite Industry Association (2021). <https://sia.org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/>.
- [SW20] Sharma S.K., Woungang I., Anpalagan A., and Chatzinotas S. *Toward Tactile Internet in Beyond 5G Era: Recent Advances, Current Issues, and Future Directions*. IEEE Access, vol. 8, pp. 56948-56991 (2020).
- [Te99] Telatar E. *Capacity of multi-antenna Gaussian channels*. European transactions on telecommunications, 10 (6), 5pp. 85-595 (1999).
- [TF17] Thors, B., Furuskär, A., Colombi, D. and Törnevik C. *Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO*. IEEE Access, vol. 5, pp. 19711-19719 (2017).
- [TP21] Tong W. and Peiying Z. *6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence*. Cambridge University Press (2021).
- [We21] *The Impact of 5G: Creating New Value across Industries and Society*. World Economic Forum, White paper (2021). <https://www.weforum.org/whitepapers/the-impact-of-5g-creating-new-value-across-industries-and-society>.
- [YW20] You X., Wang C.X., Huang J. *et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts*. Sci. China Inf. Sci. 64 (2020).
- [3G15] *System architecture for the 5G System*. 3GPP Specification 23.501. (2015) <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>.

[3G17] *NR and NG-RAN overall description; Stage 2*. 3GPP Specification 38.300 (2017)
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3191>.

[5E16] *5G for Europe: An Action Plan*. Commission Européenne.
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/5g-action-plan>

[5N21] *5G à Nantes : parlons-en ; dossier de décryptage complet* (2021).
<https://dialoguecitoyen.metropole.nantes.fr/project/5g/step/decryptage>.

Composition du groupe de travail

Serge ABITEBOUL

membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et automatique (Inria), membre du Collège de l'ARCEP.

Daniel ANDLER

membre de l'Académie des sciences morales et politiques, professeur émérite à Sorbonne Université.

François BACCELLI

membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche à l'Institut national de recherche en informatique et automatique (Inria), École normale supérieure.
Coordonnateur du groupe de travail.

Gérard BERRY

membre de l'Académie des sciences, professeur émérite au Collège de France.

Catherine BRÉCHIGNAC

secrétaire perpétuel honoraire de l'Académie des sciences.

Sébastien CANDEL

ancien président de l'Académie des sciences, professeur des universités émérite à Centrale Supélec, Université Paris-Saclay.

Mathias FINK

membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI Paris – PSL).

Éric MOULINES

membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École polytechnique.

Secrétariat éditorial

Jean-Yves CHAPRON

directeur du service des publications de l'Académie des sciences

Florent GOZO

adjoint au directeur.

Liste des personnalités auditionnées

- 7/12/2020 : **Jean-Luc BEYLAT**
Nokia Bell Labs.
- 7/12/2020 : **Gerhard FETTWEISS**
Université de technologie de Dresde, Allemagne.
- 14/12/2020 : **Joe WIART**
Télécom Paris Tech.
- 22/12/2020 : **Guillaume POUPARD**
Directeur général de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi).
- 11/01/2021 : **Patrick PÉLATA**
Mission sur les véhicules autonomes et les nouvelles mobilités.
- 25/01/2021 : **Merouane DEBBAH**
Huawei et Centrale-Supélec, Université Paris-Saclay.
- 01/02/2021 : **Didier BERTHOUMIEUX**
Nokia.
- 11/02/2021 : **Nicolas DEMASSIEUX**
Orange
Michaël TRABBIA
Orange
- 15/02/2021 : **Magali VAISSIÈRE**
Présidente de l'IRT Saint Exupéry.
- 08/03/2021 : **Emmanuel LEDINOT**
Thalès.
- 02/04/2012 : **Benoit JACQUEMIN**
Schneider.
- 23/04/2021 : **Antoine PETIT**
Président du CNRS.
- 17/05/2021 : **Maya BACACHE**
Arcep
Anne PERROT
Inspection générale des finances.
- 19/05/2021 : **Thomas COURBE**
Directeur général des entreprises, ministère de l'Économie et des Finances.

