

La 6G : promesses et défis à l'horizon 2030

Par David GESBERT

Directeur d'EURECOM et professeur en Systèmes de Communications

Cet article fait un point rapide sur certaines attendues de la 6G semblant faire consensus à ce jour. Nous donnons aussi un éclairage sur les concepts scientifiques qui joueront un rôle important dans ces futurs réseaux sans fil, tels que les surfaces réfléchissantes, l'intelligence artificielle, la spatialisation de l'information et le *sensing* intégré à la communication. Nous relevons enfin certains défis sociétaux qui conditionneront le succès de la 6G tels que la sécurité informatique, le droit à la vie numérique privée, l'impact écologique de ces systèmes.

INTRODUCTION

L'arrivée de la 6G, prévue à l'horizon 2030, sera marquée par une nouvelle norme sous l'égide du 3GPP, avec plusieurs étapes de progression sous la forme de mise à jour du standard (*releases* dans la terminologie 3GPP).

Que peut-on déjà dire de la 6G en 2024 ? En réalité, le débat est encore trop vif pour annoncer avec certitude les cas d'usage phares de la 6G ou les briques de *design* qui seront choisies pour lui servir de support, puisque la technologie est encore en phase de R&D. L'objectif de cet article est donc double. D'abord faire un point rapide sur certaines attendues semblant faire consensus à ce jour. Deuxièmement, donner un éclairage sur les concepts scientifiques qui joueront un rôle important dans ces futurs réseaux sans fil, en tenant compte aussi de certains défis sociétaux qui conditionneront le succès de la 6G.

PROMESSES ET ATTENTES DE LA 6G

Les nouveaux modes d'utilisation : réalités virtuelles et robots connectés

En incluant les modes d'utilisation industriels et ceux liés à l'internet des objets (IoT) en plus de son rôle classique de tuyau d'accès à l'internet mobile haut débit, la 5G a été la première norme de communication sans fil à devoir prendre en considération l'équilibre des ressources spectrales pour servir en simultanément les besoins distincts d'utilisateurs humains et non humains, notamment grâce aux techniques de *slicing*. La 6G va faire face aux mêmes défis avec cependant des besoins rehaussés de qualité de service attendue.

Du côté des utilisateurs humains, les modes d'utilisation évoluent vers la communication dite immersive par laquelle les données de contexte (environnement vidéo 3D réel ou synthétique) sont transportées dans le canal radio aux côtés des données usuelles (voix) telles que dans la communication holographique. Par ailleurs l'utilisation accrue du *metaverse* a des fins éducatives ou ludiques par le biais des casques de réalité virtuelle ou augmentée aux performances toujours plus impressionnantes crée aussi de nouveaux cas d'usage très haut débit pour la communication sans fil [1].

Côté machines, avec la généralisation des robots connectés, véhicules autonomes guidés par le réseau, capteurs connectés de toute nature, les usages non directement sous le contrôle d'un humain se multiplient. Ainsi la 6G verra la transition vers les réseaux *machine-centric* s'accélérer. Aux capteurs connectés bas débit déjà servis par la 4G et la 5G (capteurs trafic routier, pollution, météo, agriculture, certains appareils électroménagers du quotidien, etc.), viendront prochainement s'ajouter des clients machines beaucoup plus exigeants sur la qualité du lien radio, notamment dans le contexte de la robotique. On peut par exemple citer le cas des drones sans pilote utilisant le réseau sans fil pour les algorithmes de guidage, la voiture autonome utilisant la fusion de données locales issues des capteurs embarqués (radar, lidar) avec les informations plus globales provenant du réseau cellulaire, et enfin les robots (ou « cobots » pour *collaborative robots*) industriels communiquant entre eux pour la résolution de tâches mécaniques complexes dans le contexte de l'usine du futur. Tous ces cas d'utilisation machine posent des défis considérables pour les futurs réseaux de communication sans fil [2].

Réseaux hautes performances

Pour rendre les modes d'utilisation décrits ci-dessous réalisables, la future norme de communication sans fil devra relever le niveau de qualité afin de dépasser les performances des réseaux 5G actuels [3]. Le besoin de transporter d'importants flux vidéo générés par la réalité virtuelle ou augmentée, ou par des capteurs de vision très haut débit sur les robots (drones ou voitures) conduit à relever la qualité du lien radio de manière significative. La qualité est ici à la fois mesurée par le débit maximum atteignable pour lequel l'objectif de 1 TB/sec est donné (dans les conditions où toute la ressource spectrale est assignée à un utilisateur seul) mais aussi par le débit moyen mesuré en conditions réelles, pour lequel aucun chiffre ne peut être avancé à ce stade puisqu'il dépend de la densité d'utilisation de déploiement du réseau. La capacité, elle, est mesurée par le nombre de liens avec une performance cible qu'il est possible de maintenir en simultané par m^2 ou km^2 . En intégrant les modes d'utilisation issus de l'internet des objets aux côtés des terminaux humains classiques (téléphones, tablettes), le chiffre moyen de 1 utilisateur radio par m^2 peut être atteint. Enfin, la connectivité globale sur un maximum de surface de la planète est aussi un enjeu de choix nécessitant l'évolution de la norme, considérant notamment les technologies dites non terrestres (NTN) tels que les communications satellites et les plateformes de haute altitude pour les intégrer au réseau cellulaire.

Pour les cas d'usages liés à la cobotique (collaboration homme-robot et robot-robot), aux critères classiques de débit s'ajoutent des métriques supplémentaires telles que la latence et le positionnement, déjà présente pour la 5G mais destinées à être considérablement renforcées.

La latence mesure la réactivité du réseau par le temps écoulé entre une commande lancée au transmetteur et le moment où l'action peut commencer à être exécutée au récepteur. Mis en avant dans le cadre de la 5G et des réseaux dits *time-sensitive networks*, mais tardant encore à se matérialiser par des produits disponibles sur le marché, des protocoles de communication dédiés pouvant délivrer une latence de l'ordre de la msec ou même inférieure devront être mis en œuvre par la 6G. Une latence très faible étant particulièrement nécessaire au bon fonctionnement des cobots, ou pour les cas d'usage les plus sensibles de l'internet tactile, ou des capteurs haptiques sont connectés à des nœuds radio.

En plus de la latence, la robotique connectée pose des défis de géolocalisation qui ne peuvent être traités par les seuls systèmes satellitaires (GNSS dont le fameux GPS fait partie) à cause de leur manque de précision et leur incapacité à traiter les situations où la propagation satellitaire est obstruée (par exemple : environnement urbain dense ou *indoor*). Dans le contexte de l'usine du futur, il est essentiel pour des robots collaboratifs industriels enchaînant des tâches mécaniques de précision de pouvoir s'auto-positionner pour assurer la sécurité des opérations. On vise alors une précision de l'ordre du cm. On

retrouve des exigences similaires pour les cas où humains et robots interagissent directement, dans la même zone, par exemple dans une usine. Pour ces raisons, la géolocalisation de très haute précision fait partie des critères de performances faisant l'objet d'une attention particulière et qui va requérir de nouvelles méthodologies pour la prochaine génération.

LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE LA 6G

Plusieurs pistes technologiques sont à l'étude pour répondre aux attentes de la 6G en termes de performances. Nous brossons ici un tableau rapide, non exhaustif, des principaux concepts.

Les fréquences

La 6G va tout d'abord se reposer sur les fondements de la 5G, et cela inclus l'utilisation combinée de plusieurs plages fréquentielles. La zone sous les 6 GHz restera clé pour sa capacité à faciliter la propagation en environnement urbain et pénétrer les structures pour la couverture *indoor*. Le déploiement des ondes millimétriques (30 à 300 GHz) qui s'est révélé très difficile en 5G car très sensible aux obstacles se poursuivra pour des cas d'utilisation limités, tout comme l'introduction du THz (bandes de 300 GHz à 3 THz) qui peut donner d'excellentes performances sur de très courtes distances (ordre du mètre) [4]. La zone du Upper Mid Band (7 à 30 GHz) est une piste nouvelle qui pourra donner un compromis entre débit et couverture. Enfin les notions de partage dynamique du spectre entre opérateurs, à l'étude en 5G, restent un axe prometteur de l'amélioration de l'efficacité spectrale.

La spatialisation de l'information

Ce terme générique désigne les procédés à la couche physique par lesquels la communication ne se fait plus en mode *broadcast*, c'est-à-dire en inondant l'espace d'ondes radio de manière indiscriminée comme c'est le cas lorsque des antennes classiques sont utilisées, mais de manière dirigée par l'utilisation de faisceaux. La technologie de base dite *multiple-input multiple-output* (MIMO) inventée dans les années 1990 s'est imposée comme l'une des briques fondamentales de la 5G sous la forme du MIMO massif par lequel les antennes relais peuvent être constituées d'un grand nombre (plusieurs dizaines) d'éléments radiofréquence (RF) compacts. La 6G va rendre la communication toujours plus spatialisée et, ainsi, efficace énergétiquement. Étant combinés intelligemment entre eux, les éléments antennaires permettront la formation de faisceaux très discriminants dans le domaine spatial, c'est-à-dire que l'énergie radio générée à l'émetteur se retrouvera concentrée uniquement aux points de l'espace où se trouvent les récepteurs ciblés. Autre nouveauté, la notion de surfaces réfléchives reconfigurables (SRR) [5], conceptualisée il y a une dizaine d'années, généralise l'antenne en une notion de surface synthétique et intégrée dont les propriétés en termes de réflexion des ondes électromagnétiques sont contrôlées. Les SRR peuvent alors jouer le rôle d'antenne relais intelligente permettant de conduire les ondes radio vers une cible en contournant les obstacles à la propagation.

L'intelligence artificielle

Face à la complexification grandissante des réseaux de communication sans fil, l'IA est appelée à jouer un rôle crucial dans la conception et l'auto optimisation de ces réseaux [6]. Il existe deux niveaux fondamentaux d'intégration de l'IA dans la 6G : l'intégration au niveau du cœur de réseau et l'intégration au niveau du *edge*, c'est-à-dire les appareillages en bordure de réseau vers lesquels on vient déléster une partie des fonction et calculs afin de prendre des décisions avec un minimum de latence (*edge-AI*).

L'apprentissage automatique dans le cœur de réseau (ou le *cloud*) joue un rôle déjà important pour l'optimisation du réseau, l'allocation des ressources en fonction des classes de services, la maintenance, et la détection d'intrusion ou comportements malveillants. Davantage propre à la 6G, l'utilisation de l'IA sur les appareillages en bout de réseau (*smartphones*, capteurs, robots connectés, antennes relais, etc.) dépendra de l'évolution de leur capacité à intégrer des plateformes de calcul puissantes (GPU). L'*edge-AI* permettra la prise de décision distribuée, locale ou collaborative, d'une manière proche du signal ou des capteurs. Ainsi les appareillages prennent un rôle actif, conférant une puissante intelligence collective au réseau [7].

Le sensing

Cette notion redéfinit la fonction des ondes radio, dont le rôle jusqu'à présent a été confiné au transport de l'information, pour en faire des auxiliaires efficaces de sondage de l'environnement. En effet, en analysant avec les outils d'IA la manière dont les ondes radio sont réfléchies par les obstacles RF, il est possible de récupérer des informations de cartographie précises et des informations sur la présence d'objets (murs, humains, véhicules) aux alentours. Parce que la forme d'onde transmise est typiquement optimisée soit pour le transport de données, soit pour la détection (radar), la 6G introduit le nouveau concept de formes d'ondes hybrides permettant un compromis optimal sous l'appellation ISAC (*integrated sensing and communication*) [8]. À noter que dans certains cas, les ondes peuvent être analysées en des points sélectionnés de l'espace à l'aide de drones intelligents, permettant alors une cartographie et une géolocalisation encore plus précises (voir la Figure 1).

La Communication sémantique

Cette idée revisite les préceptes fondamentaux de la théorie de l'information de Shannon, selon lesquels les fonctions d'encodage sont optimisées pour le transport fiable de données binaires sans égard pour la nature de l'information transportée [9]. Au contraire, le cadre sémantique met en valeur la finalité de la *data*, son degré d'importance dans le temps, et le type d'action menée avec elle au récepteur, pour encoder plus efficacement les infor-



Figure 1 : Station de base cellulaire volante. Le prototype, développé en France par Eurecom, peut assurer une extension de connectivité. Il peut aussi servir de capteur autonome pour la localisation des nœuds terrestres.

mations et ainsi alléger la charge du réseau afin de gagner en capacité ou en efficacité énergétique [10]. Ainsi, par exemple, la communication d'une séquence vidéo à des fins de détection se fera sur la base de l'extraction des éléments clés d'une scène par l'IA, qui seront les seuls à être transmis.

SÉCURITÉ ET IMPACT ÉCOLOGIQUE

Le succès de la 6G ne sera pas mesuré uniquement par sa capacité à offrir de meilleurs tuyaux de données. Comme on a déjà pu l'observer lors du déploiement de la 5G, les enjeux sociétaux sont devenus primordiaux pour l'acceptation de la technologie par le grand public. On prendra ici deux exemples, tout d'abord la question de la sécurité associée à ces systèmes et enfin la question de leur empreinte écologique.

Les aspects de sécurité recouvrent eux-mêmes des questions très diverses. Tout d'abord, la résilience et la redondance des équipements, à renforcer par rapport à la 5G, puis l'intégrité des données véhiculées, la mise en œuvre de protocoles de cryptage et d'authentification robustes, y compris par de nouvelles méthodes issues du quantique, pour se protéger contre les violations de données et les prises de contrôle non-autorisées qui peuvent mettre en danger le fonctionnement de systèmes cyber-physiques essentiels aux infrastructures nationales (usines, centrales nucléaires, aéroports, etc.). Ces menaces seront à spectre plus large que dans la 5G à cause de la multiplication des points de contact dans le réseau [11].

Le deuxième champ d'application est celui de la sécurité individuelle, qui touche à la confidentialité des données et la protection de la vie privée. Dans un mode plus numérisé où chacun est amené à partager une quantité toujours plus grande des données personnelles sur le réseau, la 6G, tout comme les réseaux filaires doivent mettre en place des mécanismes avancés pour la gestion sécurisée des données personnelles.

L'autre grand enjeu sociétal de la 6G concerne son impact environnemental qui recouvre là aussi plusieurs notions diverses allant de l'efficacité énergétique, à l'empreinte globale en passant par les questions de durabilité et recyclabilité des équipements vendus. Avec un accent fort mis dans la 5G sur l'efficacité énergétique dès la phase de *design*, la génération de systèmes de communication en cours a montré un gain en efficacité jusqu'à x 10, en termes de joules par bit transportés, obtenu par une combinaison : de protocoles de désactivation en fonction du trafic, de nouvelles modulations plus efficaces et de densification du réseau. Malgré tout, il est notoire que l'empreinte énergétique globale de la 5G reste supérieure à celle des générations précédentes (même si l'impact très positif que ces systèmes de communication peuvent avoir pour aider d'autres industries à consommer moins, reste globalement insuffisamment mesuré, en particulier à l'échelle mondiale [12] [13] [14]). Le paradoxe s'explique par la multiplication des cas d'usage et la généralisation des applications très haut débit telles que la vidéo VHD sur les *smartphones*. L'amélioration de l'efficacité énergétique reste malgré tout un objectif fondamental du *design* de la 6G, qui pourra se reposer notamment sur les méthodes de spatialisation évoquées plus haut, l'utilisation de l'AI en cœur de réseau pour optimiser les ressources et la mise en œuvre de mécanismes sémantiques qui feront baisser significativement la quantité de données brutes à transporter dans les tuyaux. Tirant les leçons de la 5G néanmoins, il est raisonnable de penser qu'une réduction globale de l'empreinte énergétique ne pourra pas se faire uniquement par des critères d'amélioration techniques du système, et devra faire intervenir des mécanismes incitatifs visant un usage raisonné de ces futurs outils de communication.

CONCLUSION

La 6G cible des objectifs ambitieux en termes de performance et de nouveaux cas d'usage comme la communication immersive et la robotique connectée de précision. De nouvelles briques technologiques sont à l'étude, comme la spatialisation de la transmission, l'IA

intégrée aux fonctions de cœur de réseau ou embarquée dans les appareillages, la communication sémantique, et d'autres avancées encore, qui doivent permettre de répondre aux attentes. Plus largement, un succès humain autour de la 6G ne pourra être assuré qu'en prenant une vue sur les enjeux globaux de ces systèmes avec la prise en compte des attentes du public concernant la sécurité, la protection des droits numériques individuels, et l'impact environnemental.

RÉFÉRENCES

- [1] TANG F., CHEN X., ZHAO M. & KATO N. (2023), "The roadmap of communication and networking in 6G for the Metaverse", *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, n°4, pp. 72-81.
- [2] NGUYEN D. C. *et al.* (2022), "6G Internet of Things: a comprehensive survey", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n°1, pp. 359-383.
- [3] WANG C.-X. *et al.* (2023), "On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, n°2, pp. 905-974.
- [4] TRIPATHI S., SABU N.V., GUPTA A.K. & DHILLON H.S. (2021), "Millimeter-wave and Terahertz spectrum for 6G wireless", In WU Y. *et al.*, *6G Mobile Wireless Networks, Computer Communications and Networks*, Springer.
- [5] LIU Y. *et al.* (2021), "Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, n°3, pp. 1546-1577.
- [6] GÜNDÜZ D., DE KERRET P., SIDIROPOULOS N. D., GESBERT D., MURTHY C. R. & VAN DER SCHAAR M. (2019), "Machine Learning in the Air", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, n°10, pp. 2184-2199.
- [7] XU W., YANG Z., NG D. W. K., LEVORATO M., EL-DAR Y. C. & DEBBAH M. (2023), "Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: semantic communication, edge computing, and wireless sensing", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 17, n°1, pp. 9-39.
- [8] PIN TAND K. *et al.* (2021), "Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions", 2021 1st IEEE international online symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S), Dresden, Germany.
- [9] LUO X., CHEN H.-H. & GUO Q. (2022), "Semantic communications: overview, open issues, and future research directions", *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, n°1, pp. 210-219.
- [10] STRINATI E. C., BARBAROSSA S. (2021), "6G networks: beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications", *Computer Networks*, vol. 190.
- [11] PORAMBAGE P., GÜR G., M. OSORIO D. P., LIYANAGE M., GURTOV A. & YLIANTTILA M. (2021), "The roadmap to 6G security and privacy", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1094-1122.
- [12] IMOIZE A. L., ADEDEJI O., TANDIYA N. & SHETTY S. (2021), "6G enabled smart infrastructure for sustainable society: opportunities, challenges, and research roadmap", *Sensors*, 21(5), article 1709.
- [13] Numéro « Transitions énergétique et numérique », *Annales des mines - Responsabilité & Environnement*, avril 2023, https://annales.org/re/2023/re_110_avril_2023.html
- [14] FAURE A. & ROUSSILHE G. (2024), Note d'analyse de France Stratégie, « Quelle contribution du numérique à la décarbonation ? », juillet, <https://www.strategie.gouv.fr/publications/contribution-numerique-decarbonation>