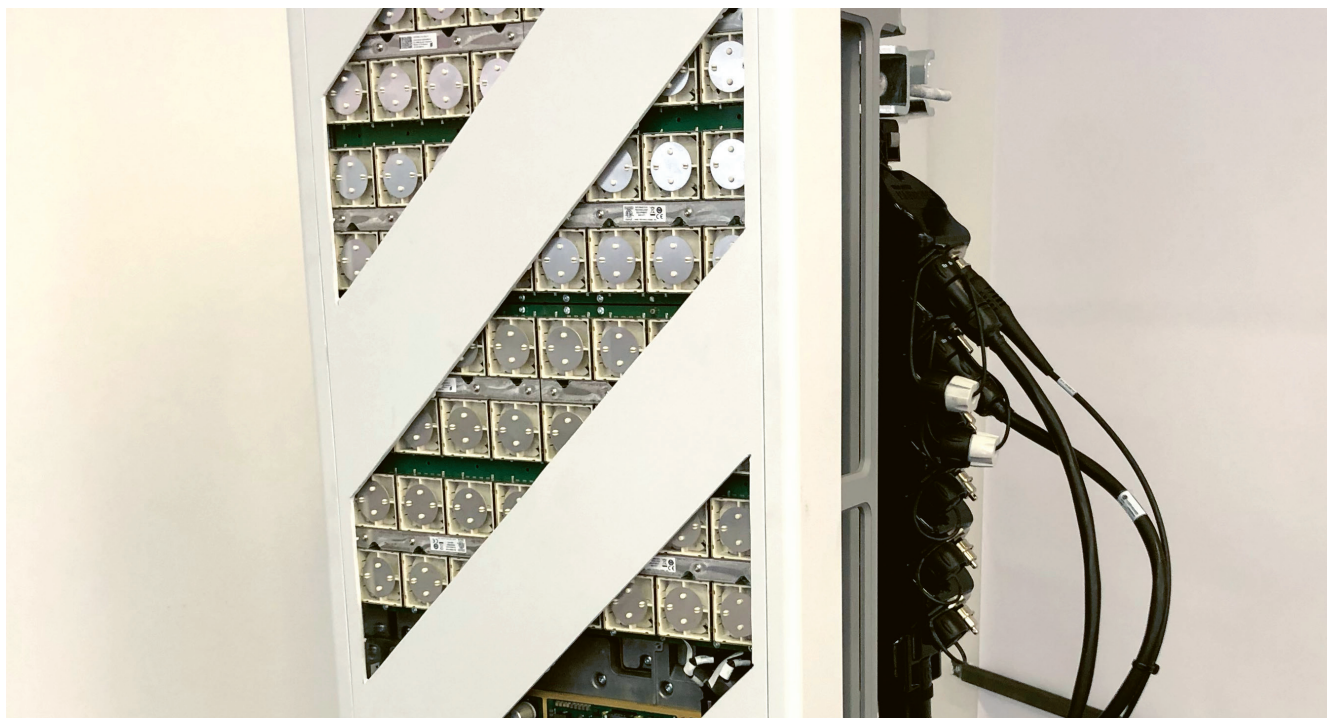




Antenne adaptative avec couvercle de protection découpé : les éléments individuels sont clairement visibles.

Antennes adaptatives pour la 5G

Utilisation, défis et exposition | Les antennes qui ajustent leur direction de transmission ne constituent rien de nouveau. Pour la 5G, ces antennes adaptatives sont désormais utilisées pour la première fois à large échelle dans les réseaux de téléphonie mobile. Comment ces antennes fonctionnent-elles et pourquoi la 5G en a-t-elle besoin ? Quels défis représentent-elles et qu'en est-il des immissions ?

HUGO LEHMANN

Depuis l'arrivée en force des smartphones et l'omniprésence correspondante de l'Internet mobile, de plus en plus de données transitent via les réseaux de téléphonie mobile. En 2018 par exemple, le réseau mobile de Swisscom a transmis la même quantité de données en une semaine qu'en 2011 sur l'ensemble de l'année. Selon l'Ericsson Mobility Report 2019, le volume des données mobiles va encore quadrupler en Europe occidentale d'ici à 2025. [1] Pour faire face à cet énorme flux de données, les réseaux mobiles doivent être constamment adaptés.

Au début des années 1990, lorsque la technologie GSM – ou deuxième génération de téléphonie mobile (2G) – a été

introduite en Suisse, la largeur d'un canal n'était que de 0,2 MHz. Cela suffisait à transmettre les conversations dans une qualité compréhensible ainsi que de courts messages écrits. Pour les technologies qui ont suivi, la 3G et la 4G, cette valeur a atteint typiquement 5 MHz, respectivement 20 MHz, soit des canaux 25 à 100 fois plus larges que les canaux GSM. Afin de satisfaire la soif de données, une bande passante de 100 MHz est désormais la norme pour la 5G. Cependant, des bandes de fréquence contiguës de cette largeur ne sont disponibles qu'à des fréquences élevées, raison pour laquelle une bande de fréquences à 3,5 GHz a été définie dès 2015, lors de la conférence mondiale des radiocommunications.

Cette bande de fréquence est disponible pour les communications mobiles en Suisse depuis 2019 et est utilisée pour la 5G. En 2019, cette même conférence a déterminé d'autres bandes dans le domaine des ondes millimétriques (au-delà de 24 GHz), qui s'avéreront nécessaires pour atteindre les débits de données les plus élevés promis par la 5G (jusqu'à 20 Gb/s).

Pourquoi la 5G nécessite-t-elle des antennes adaptatives ?

La bande passante est une chose, mais qu'en est-il des propriétés de transmission de ces fréquences ? Du point de vue technique, les fréquences plus élevées affichent de moins bonnes caractéris-

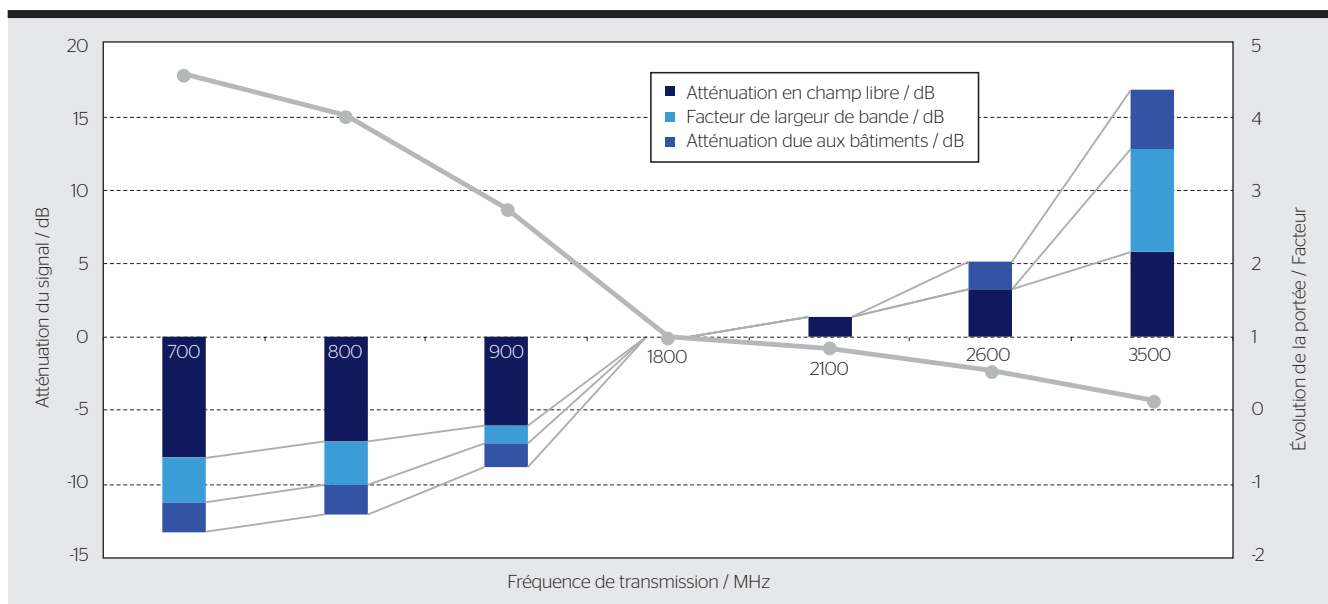


Figure 1 Atténuation en champ libre, facteur de bande passante (pour les porteuses typiques des fréquences de transmission données) et atténuation supplémentaire due aux bâtiments pour différentes fréquences de transmission par rapport aux signaux à 1800 MHz (histogramme, échelle de gauche). La courbe grise représente la portée résultante (échelle de droite).

tiques de transmission que les fréquences inférieures à 3 GHz utilisées jusqu'à présent dans les communications mobiles. Et ceci est déjà valable à 3,5 GHz. L'atténuation en champ libre est une mesure de l'intensité du signal au niveau du récepteur, pour une fréquence de transmission à une distance donnée. Pour les fréquences plus élevées, cette mesure augmente, ce qui se traduit par une portée réduite des signaux. Cependant, à des fréquences plus élevées, l'atténuation dues aux enveloppes des bâtiments ou aux obstacles est aussi plus marquée. Cela signifie que les signaux pénètrent moins bien dans les bâtiments ou sont atténués par les arbres. Ceci est également valable pour l'être humain – les fréquences plus élevées sont essentiellement absorbées à la surface du corps et les organes internes ne sont pratiquement pas exposés. Les basses fréquences pénètrent mieux dans les bâtiments, mais aussi dans notre corps. Un autre effet, à ne pas sous-estimer: la croissance de la bande passante. Étant donné que la puissance de transmission est répartie sur une plus large bande de fréquence, le signal utile arrivant au niveau du récepteur est réduit. Ces corrélations sont représentées schématiquement dans la **figure 1** par rapport à une fréquence de transmission de 1800 MHz.

Aux fréquences encore plus élevées des ondes millimétriques – dans la 5G,

ce terme est déjà utilisé à partir de 24 GHz – les propriétés d'atténuation sont aussi plus prononcées. Ici, de plus, l'atténuation causée par la pluie, le brouillard et le feuillage augmente également. Par conséquent, les ondes millimétriques ne pourront probablement être utilisées raisonnablement que dans le cas d'une connexion visuelle directe. Ces fréquences ne figureront au premier plan que pour l'approvisionnement des endroits avec une densité d'utilisateurs très élevée, ou seront utilisées pour les connexions à domicile sans fil comme c'est déjà le cas aux États-Unis.

Pour pallier les moins bonnes conditions de propagation aux fréquences plus élevées, des antennes adaptatives sont utilisées pour la 5G, et ce, tant dans la bande à 3,5 GHz qu'avec les ondes millimétriques. Avec de telles antennes, le signal peut être focalisé dans la direction de l'utilisateur et les caractéristiques de transmission amoindries peuvent être compensées. On parle également de beamforming ou de « Massive MIMO » (Multiple Input Multiple Output). En concentrant le signal émis sur une zone plus limitée dans l'espace, les interférences dans le réseau mobile sont aussi réduites, ce qui se traduit par un meilleur rapport signal sur bruit. En outre, cette focalisation signifie également que les signaux peuvent être transmis de manière plus ciblée, avec moins d'énergie électrique.

Comment fonctionnent les antennes adaptatives ?

Le principe des antennes adaptatives est presque aussi vieux que la communication sans fil et est basé sur le principe physique de la superposition et des propriétés d'interférence des ondes. Ainsi, en 1909, Karl Ferdinand Braun décrivait dans la conférence donnée lorsqu'il a reçu le prix Nobel [2], comment il a, dès 1905, changé la direction de transmission d'une antenne en modifiant les phases des signaux de différentes antennes. Cette technique est utilisée depuis un certain temps pour les applications radar et la radioastronomie. Jusqu'à présent, les réseaux de téléphonie mobile se sont passés de cette technologie complexe et coûteuse. Du fait de l'utilisation de fréquences plus élevées et des progrès technologiques facilitant l'utilisation des antennes adaptatives, ces dernières constituent toutefois aujourd'hui une composante essentielle des réseaux mobiles de la 5G.

Ces antennes, parfois appelées « antennes intelligentes », sont composées d'un grand nombre d'éléments d'antenne contrôlés individuellement (**figure de titre**). Il s'agit typiquement de 64 éléments, chacun doté de son propre amplificateur, disposés sous la forme d'une matrice. En ajustant spécifiquement la phase, la direction de transmission peut être modifiée sans avoir à déplacer physiquement l'antenne ou ses éléments. Plus

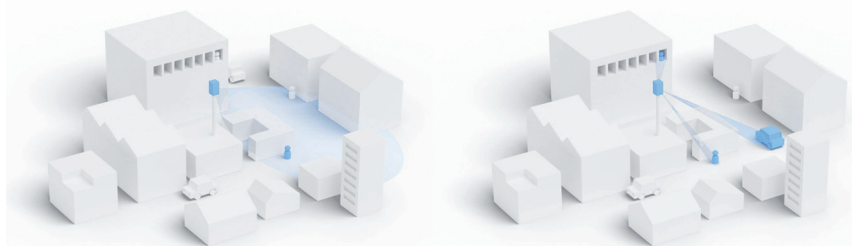


Figure 2 Avec les antennes conventionnelles, les signaux sont toujours envoyés dans toute la zone de transmission (à gauche), tandis que les antennes adaptatives dirigent les signaux de manière ciblée vers l'utilisateur (à droite).

le nombre d'éléments d'antenne coordonnés simultanément est grand, plus le signal est concentré et plus le volume de la zone de réception est restreint.

La norme 5G prévoit actuellement diverses réalisations pour la formation de ces faisceaux (beamforming). Dans la version la plus simple, la meilleure configuration d'antenne possible pour l'utilisateur est sélectionnée en fonction de la caractéristique du signal de référence reçu par l'appareil mobile. Les paramètres prédéfinis, appelés précodages, déterminent le décalage de phase pour les différents éléments d'antenne et définissent le faisceau à générer. Les précodages sont répertoriés dans un tableau dénommé « codebook » dans la norme 5G. [3] On parle dans ce cas de beamforming basé sur un codebook avec des configurations prédéterminées.

Les procédures basées sur un codebook sont plus simples, mais elles ne tirent pas pleinement parti de toutes les informations disponibles et n'exploitent pas entièrement le potentiel des antennes adaptatives. Une meilleure adaptation des antennes aux besoins des utilisateurs peut être réalisée lorsque le terminal envoie un signal test qui est mesuré par la station de base. Étant donné que le chemin du terminal à la station de base est soumis aux mêmes conditions de propagation que le trajet du signal de l'antenne au téléphone mobile, la station de base peut calculer le meilleur signal possible et apporter des ajustements individuels à la configuration de l'antenne adaptative. On parle aussi dans ce cas de procédures réciproques.

Antennes adaptatives et exposition

La transmission ciblée de l'information à l'utilisateur individuel dans la zone d'émission résulte, grâce au beamforming, en une dynamique plus élevée des

signaux envoyés qu'avec les anciennes technologies de téléphonie mobile. Les signaux ne sont envoyés que là où ils sont nécessaires. La **figure 2** illustre schématiquement le fonctionnement des antennes passives et adaptatives. Cette diversité spatiale conduit non seulement à la réduction des interférences, mais, en moyenne temporelle, également à une exposition plus faible qu'avec les technologies antérieures.

Une simulation pour la ville de Gand, en Belgique, montre qu'un réseau capable de « Massive MIMO » génère cinq fois moins d'exposition pour les mêmes scénarios d'utilisation qu'un réseau 4G sans antennes adaptatives. [4] L'analyse montre également que plus le nombre d'antennes élémentaires utilisées est élevé, plus l'exposition est faible. Ceci n'a pas encore été prouvé par des mesures – la mise en œuvre des réseaux 5G étant encore trop récente – mais cela montre le potentiel de cette technologie également dans le domaine de la réduction des immissions.

Des simulations et des mesures sur des antennes adaptatives individuelles montrent que, généralement, seule une fraction de la valeur maximale théorique de la puissance de transmission est émise en cas d'utilisation du beamforming. [5] Même en cas d'utilisation importante de la capacité et pour différents scénarios, jamais plus d'un quart de la puissance maximale théorique n'est émise sur une durée moyenne de 6 min. La durée moyenne de 6 min est pertinente pour le respect des valeurs limites d'immissions (voir l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI), annexe 2, 11 [6]). Ces simulations ont été confirmées par des mesures de la puissance de transmission moyenne sur 6 min des stations de base dotées d'antennes adaptatives. [7]

En résumé, cela signifie que l'exposition par unité d'information transmise au moyen du beamforming diminue par rapport aux réseaux de téléphonie mobile actuel.

Défis

Outre les avantages décrits plus haut, l'utilisation d'antennes adaptatives est aussi à l'origine de nouveaux défis: ceux-ci sont d'une part de nature technique, comme la plus grande complexité des antennes intelligentes, et relèvent d'autre part des domaines de la réglementation et de la communication.

En Suisse, les antennes adaptatives sont aujourd'hui évaluées dans la réglementation de la même manière que les antennes passives. Il est pris comme hypothèse qu'à tout moment, toute la puissance est émise dans toutes les directions. Cependant, ce cas ne se produit jamais dans la réalité, puisque la puissance totale de l'antenne est répartie entre les utilisateurs actifs: avec deux utilisateurs actifs simultanément, la puissance de transmission par faisceau correspond à la moitié de la puissance maximale. S'il y a quatre utilisateurs, un quart de la puissance maximale est émis dans chacune des directions. Dans le cas de nombreux utilisateurs bien répartis géographiquement, l'exposition est d'autant plus réduite. D'un autre côté, si un seul utilisateur ou plusieurs utilisateurs sont actifs dans la même direction, toute la puissance est certes émise dans cette direction, mais grâce au beamforming, pas sur l'ensemble de la zone de couverture de l'antenne. Cela signifie que dans ce cas, l'exposition est focalisée sur les utilisateurs, tout en restant faible dans le reste de la zone de transmission. La population craint souvent que l'exposition dans le faisceau généré par les antennes adaptatives soit excessive. C'est sans compter que même dans ces faisceaux, les valeurs limites pertinentes doivent toujours être respectées et qu'il est donc garanti que les immissions, quel que soit le cas de figure, n'augmentent pas de manière incommensurable.

La réglementation actuelle basée sur le pire scénario possible conduit à une surestimation massive de l'exposition réelle – ceci a également été reconnu par le législateur. Afin de mieux utiliser le potentiel des antennes adaptatives, l'ORNI a déjà été adaptée le 1^{er} juin 2019. Dans le cas des antennes adaptatives, la

variabilité des directions de transmission et des diagrammes d'antenne doit être prise en compte. Cependant, il a été omis jusqu'à présent de définir comment cela devait être fait concrètement. Selon l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'approche basée sur le pire des cas doit continuer d'être prise en compte. [8] Bien que, comme l'OFEV l'indique clairement dans l'une de ces informations, cette règle mène à une surestimation des immissions, certains cantons se refusent toujours à autoriser les antennes adaptatives.

Dans d'autres pays, les avantages évidents des antennes adaptatives sont reconnus et déjà pris en considération dans l'évaluation de l'exposition. En France, par exemple, un facteur de réduction de la puissance de 30 peut être pris en compte pour calculer l'exposition générée par une antenne adaptative. [9] Ceci mène à une réduction du champ électrique calculé d'un facteur 5,5, ce qui correspond assez bien à la réduction simulée de l'exposition générée par les antennes adaptatives, mentionnée plus haut. [3] Cela signifie que les antennes adaptatives peuvent être exploitées en France à une puissance 30 fois plus élevée qu'en Suisse. Par conséquent, les stations de téléphonie mobile existantes peuvent être utilisées sans aucun problème avec des antennes adaptatives pour la 5G.

Dans une situation où seuls 2% des sites existants en Suisse peuvent être utilisés pour une expansion de la 5G à haute performance en raison des limites de précaution strictes [10], un tel facteur représenterait un moyen de mieux exploiter les sites existants. Ceci est d'autant plus important que la réalisation de nouvelles installations est devenue difficile, voire impossible, en raison de l'attitude critique d'une grande partie de la population à l'égard de la 5G et des demandes de moratoires dans certains cantons. Pour ces raisons, le secteur des télécommunications a proposé, en 2018 déjà, une réglementation qui prévoit un facteur de réduction de 10, et non de 30 comme en France. Comme cela a déjà été mentionné, un tel règlement n'exposerait en aucun cas la population d'une manière dangereuse.

Juste un petit calcul: si le facteur de réduction de 10 revendiqué était appliqué à la puissance de transmission en Suisse, un champ électrique instantané maximum d'à peine 16 V/m pourrait être généré. Mais sur une durée moyenne

de 6 min, la limite de précaution de 5 V/m serait toujours respectée. Cela pourrait être assuré avec un logiciel déjà utilisé à l'échelle internationale. Avec ce champ électrique de 16 V/m de courte durée, la sécurité de la population est garantie. Par exemple, la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a récemment confirmé les limites d'immissions pour le domaine de fréquences de la téléphonie mobile (36–61 V/m). Selon l'ICNIRP, celles-ci protègent contre tous les effets nocifs scientifiquement fondés, et cela est aussi valable pour l'exposition générée par la 5G. [11] Étant donné que les champs électriques à court terme sont encore inférieurs à la valeur limite des immissions de 61 V/m, et ce, d'un facteur de 2 à 3, un tel règlement tiendrait également compte du principe de précaution de la loi suisse sur la protection de l'environnement.

Enfin, il convient également de mentionner que les antennes adaptatives et la 5G peuvent non seulement transmettre des données plus efficacement et avec moins d'immissions, mais disposent également d'un grand potentiel pour augmenter l'efficacité énergétique. Si les antennes adaptatives peuvent être utilisées à leur plein potentiel, un nombre plus restreint de nouvelles installations devront être construites en Suisse. Chaque installation consommant une certaine quantité d'énergie de base, un nombre moins élevé d'installations signifie également une consommation moindre d'énergie. En outre, la 5G dispose d'un potentiel d'économie d'électricité plus élevé que la 4G en raison de sa structure de signal réduit à l'essentiel. En particulier, l'utilisation du mode «deep sleep» peut réduire la consommation d'énergie des stations de téléphonie mobile 5G d'un facteur 9. [12] En utilisant la technologie 5G pour la suite du développement des réseaux de téléphonie mobile au lieu de la technologie LTE, des économies d'énergie de 50 à 70% pourraient être réalisées. Par rapport à la 2G ou à la 3G, la comparaison serait encore plus favorable à la 5G.

Perspectives

L'utilisation d'antennes adaptatives constitue un élément important pour la réalisation d'un réseau de téléphonie mobile 5G performant. Les avantages en termes de flexibilité, de gain de capacité,

d'exposition moindre et liée à l'utilisation, et de réduction de la consommation énergétique sont évidents. Le Conseil fédéral a procédé, en 2019 déjà, aux ajustements nécessaires dans l'ordonnance correspondante. Il ne manque plus que les concrétisations correspondantes dans les aides à l'exécution. Pour que la Suisse continue d'avoir les meilleurs réseaux de téléphonie mobile au monde, ces ajustements indispensables et urgents devraient être entrepris rapidement.

Références

- [1] Ericsson Mobility Report, November 2019, www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf
- [2] Karl Ferdinand Braun, «Electrical oscillations and wireless telegraphy», Nobel Lecture, December 11, 1909, www.nobelprize.org/uploads/2018/06/braun-lecture.pdf
- [3] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 5G; NR; Physical layer procedures for data, ETSI TS 138 214 V15.3.0.
- [4] M. Matalatala, M. Deruyck, S. Shikhandtsov, E. Tanghe, D. Plets, S. Goudos, K.E. Psannis, L. Martens, W. Joseph, «Multi-Objective Optimization of Massive MIMO 5G Wireless Networks towards Power Consumption, Uplink and Downlink Exposure», Appl. Sci. 2019, 9 (22), 4974.
- [5] B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi, C. Törnevik, «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.
- [6] Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI), 814.710.
- [7] Case studies supporting IEC 62232 – Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radio-communication base stations for the purpose of evaluating human exposure, IEC TR 62669 ED2 2018, Tabelle 15.
- [8] Office fédéral de l'environnement, «Informations concernant les antennes adaptatives et 5G (autorisations et mesures)». www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/informationen_adaptive_antennen_5g.pdf.download.pdf/informationen_concernant_les_antennes_adaptatives_et_5g_2020_f.pdf, 31 janvier 2020.
- [9] Agence nationale des fréquences (ANFR), Lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques. www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/consultation/consultation-5G-Lignes-directrices-nationales.pdf, octobre 2019.
- [10] Rapport «Téléphonie mobile et rayonnement», publié par le groupe de travail téléphonie mobile et rayonnement sur mandat du DETEC, www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/bericht-mobilfunk-und-strahlung.pdf.download.pdf/Rapport_TelephonieMobile-Rayonnement.pdf, 28 novembre 2019.
- [11] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf & www.icnirp.org/cms/upload/presentations/ICNIRP_Media_Release_110320.pdf, 11 mars 2020.
- [12] P. Frenger, R. Tano, «More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption», 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1–5.



Auteur

Dr. Hugo Lehmann est responsable du centre de compétence Ondes électromagnétiques de Swisscom.
→ hugo.lehmann@swisscom.com