



Mars 2017

Notice d'information relative à la technologie WLAN

Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)

Résumé

Les réseaux WLAN (Wireless Local Area Networks) sont des réseaux locaux sans fil. Ils permettent d'accéder facilement à l'internet dans un bâtiment ou un jardin. A l'intérieur, selon le débit, ils couvrent habituellement quelques dizaines de mètres.

Depuis 1997 déjà, avec les normes IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), il existe des interfaces radio normalisées pour ces réseaux locaux. Ces premiers systèmes permettaient un débit de données maximal brut de 1 ou 2 Mbit/s. Sur cette base, les normes ont ensuite été constamment développées, principalement afin d'augmenter le débit de données. Actuellement, d'un point de vue purement arithmétique, des débits bruts allant jusqu'à 6,9 Gbit/s peuvent être obtenus avec le standard IEEE 802.11ac. Toutefois, le marché ne propose généralement que des appareils n'excédant pas 1,7 Gbit/s. En pratique, dans des conditions réelles, on n'atteint en principe que 800 Mbit/s.

La fin de l'évolution des réseaux WLAN n'est de loin pas à l'ordre de jour. Le recours à des antennes multiples (p. ex. beamforming) est une approche très prometteuse pour continuer à augmenter les capacités.

Actuellement, quatre bandes de fréquences libres de concession sont à disposition pour les réseaux WLAN. Les bandes les plus utilisées se trouvent dans le spectre des 2,4 GHz et 5 GHz. Il y a également la bande des 60 GHz (pour de très gros débits et des courtes distances jusqu'à environ 10 mètres) et celles des 900 MHz (pour des débits relativement faibles et des distances relativement grandes de quelques centaines de mètres).

La présente notice d'information se concentre sur les aspects techniques des réseaux WLAN. Les bases juridiques sont disponibles sous: https://www.bakom.admin.ch/bakom/fr/page-daccueil/appareils-et-installations/equipements-particuliers/wlan_rlan.html.

Les FAQ sur la technologie WLAN sont publiées sous: https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/fr/dokumente/haeufige_fragen.pdf.download.pdf/haeufige_fragen.pdf

Table des matières

1	Introduction	1
2	Que désigne le terme "WLAN"	1
3	Principe d'un réseau WLAN	1
3.1	Point d'accès	2
3.2	Terminal mobile	2
3.3	Services	3
4	Sécurité	3
4.1	Protection contre les écoutes.....	3
4.2	Compatibilité électromagnétique et environnement	4
5	Normes utilisées	4
5.1	WLAN basé sur la norme DECT	4
5.2	WLAN selon la norme IEEE 802.11	4
5.3	WLAN selon la norme 802.11b	4
5.4	WLAN selon la norme 802.11g	5
5.5	Bluetooth	5
5.6	WLAN selon la norme IEEE 802.11a.....	5
5.7	WLAN selon la norme IEEE 802.11h.....	6
5.8	WLAN selon la norme IEEE 802.11n.....	6
5.9	WLAN selon la norme IEEE 802.11ac.....	7
5.10	WLAN selon la norme IEEE 802.11ad.....	7
5.11	WLAN selon la norme IEEE 802.11ah.....	7
5.12	LTE.....	8
6	Normes, fréquences et puissances d'émission pour les réseaux WLAN en Suisse	8
6.1	Les ERC/DEC(04)08 en un coup d'œil	9
7	Interfaces radio WLAN	11
8	Obligation d'annoncer pour les réseaux WLAN	14
9	Annexe	15
9.1	Autres sources d'information	15
9.2	Abréviations	15
9.3	Dérivation des débits binaires (bruts) de quelques systèmes OFDM.....	18

1 Introduction

La notice d'information WLAN donne au public intéressé une introduction générale sur les réseaux sans fil.

2 Que désigne le terme "WLAN"

Actuellement, dans les bureaux, la plupart des ordinateurs personnels (PC) sont interconnectés. En général, l'interconnexion est établie au moyen d'un câble reliant le PC à la prise de branchement au réseau. Selon le réseau et le contrôleur utilisés, les débits peuvent atteindre 10 Mbit/s, 100 Mbit/s, voire quelques Gbit/s.

Depuis longtemps, on cherchait à s'affranchir du câble pour éviter son installation coûteuse dans les bâtiments et pour pouvoir utiliser son PC ou son ordinateur portable n'importe où au bureau. Grâce à de nouvelles possibilités informatiques et aux progrès dans le domaine des semi-conducteurs, il est devenu possible de concrétiser ce souhait. Aujourd'hui, les réseaux sans fil sont accessibles à tout un chacun à des prix abordables.

Les termes *radio local area network* (RLAN) et *wireless local area network* (WLAN) sont synonymes.

3 Principe d'un réseau WLAN

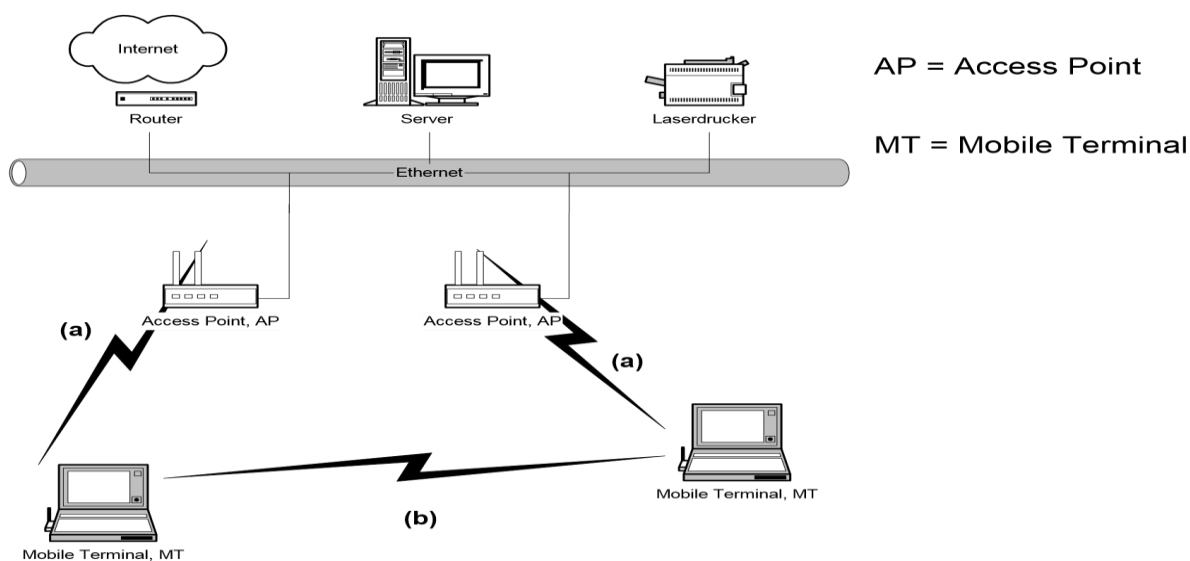


Illustration 1: Réseau WLAN

Le réseau WLAN permet d'établir des liaisons entre le terminal mobile et le point d'accès (a). Le terminal mobile fait ainsi partie de l'Ethernet et peut accéder à tous les appareils connectés, comme les imprimantes, les serveurs, les raccordements internet, etc.

Si aucune infrastructure n'est disponible, des liaisons directes peuvent être établies pour échanger des données (b) entre plusieurs terminaux mobiles.

La portée de la liaison sans fil dépend de plusieurs facteurs, comme:

- la puissance d'émission
- la situation d'interférence (avec d'autres participants, option d'optimisation offerte par le réseau)

- le débit de la transmission de données (type de modulation)
- l'environnement (à l'intérieur de la maison ou à l'extérieur, contact visuel)

On peut admettre les principes suivants:

- plus le débit de transmission est élevé, plus la portée est réduite
- plus il y a d'obstacles entre les participants recourant à cette technologie sans fil et les points d'accès, plus la portée est réduite
- plus les participants actifs simultanément sont nombreux, plus le débit est faible

Ces éléments expliquent pourquoi le débit de transmission de données diminue lorsque l'éloignement augmente ou en cas de perturbation réciproque (interférence).

Lorsque l'on parle du débit de transmission de données, il s'agit du débit maximal dans les deux directions. Il se répartit entre les différents participants qui utilisent ce canal; plus les participants sont nombreux, plus le débit de chacun est faible. Par ailleurs, il faut aussi tenir compte des pertes liées aux entêtes des paquets de données ainsi qu'au mécanisme d'accès au réseau, qui réduisent encore le débit disponible.

3.1 Point d'accès

Le point d'accès est le poste de commande du réseau WLAN. C'est à travers lui que les utilisateurs du réseau sans fil sont reliés au réseau fixe. Le point d'accès est donc habituellement relié à l'Ethernet.

Souvent, d'autres fonctions sont intégrées au point d'accès, par exemple:

- ADSL / modem câble
- Port LAN de 10/100 MHz
- Routeur
- Serveur d'impression

Des fonctions logicielles supplémentaires peuvent également être disponibles sur ce point d'accès:

- Pare-feu
- Contrôle d'accès
- Protection du mot de passe
- Cryptage

3.2 Terminal mobile

Autrefois, pour le raccordement d'abonné, il fallait une carte PCMCIA pour les ordinateurs portables, et pour les PC, une carte PCI indépendante ou une carte support PCI, pouvant à son tour accueillir une carte PCMCIA. Aujourd'hui, les interfaces WLAN sont intégrées de manière fixe dans les PC, les ordinateurs portables et les smartphones.

Le raccordement d'abonné communique avec le point d'accès via des interfaces radio; c'est au point d'accès que des liaisons sont établies avec l'Ethernet câblé.

Grâce à une fonction ad-hoc, il est aussi généralement possible d'échanger directement des données sans point d'accès.

Le terminal mobile n'est, au sens propre, qu'un terminal portable, vu que les systèmes ne sont pas conçus pour une exploitation mobile. Toutefois, les différentes normes permettent toutes le transfert d'une station de base à la suivante.

Des plateformes d'itinérance entre les réseaux WLAN d'une part et GSM, UMTS et LTE d'autre part sont actuellement en phase de développement.

3.3 Services

Les réseaux WLAN ne sont pas véritablement des services. Les systèmes en vente permettent de connecter sans fil le PC à l'Ethernet. Pour l'utilisateur, ces systèmes sont totalement transparents, ce qui signifie qu'il ne voit aucune différence s'il est connecté par le câble ou sans fil. Ainsi, toutes les applications et tous les services du réseau (échange de fichiers, accès à l'imprimante, internet, etc.) sont disponibles sans restrictions (à l'exception du débit limité).

Actuellement, l'offre se limite aux applications LAN et à l'accès internet avec toutes ses possibilités.

4 Sécurité

4.1 Protection contre les écoutes

Avec les réseaux WLAN, la sécurité constitue un véritable problème car il est facile d'accéder aux interfaces radio, même sans accès local. La portée est d'environ 100 m et peut atteindre 300 m au maximum. Dernièrement, il est toutefois apparu que, si l'on déploie les moyens nécessaires, le cryptage pouvait être déchiffré. En outre, il existe déjà des outils logiciels qui permettent de casser la procédure de cryptage habituelle.

Les procédures de cryptage, très nombreuses et variées, reposent sur une ou plusieurs couches du modèle OSI.

La méthode de cryptage largement répandue WEP (Wired Equivalent Privacy), fondée sur l'algorithme RC-4, n'est pas fiable. Elle fonctionne avec une clé WEP constante et un vecteur d'initialisation variable transmis en clair sur le canal radio. D'une longueur de 24 bits seulement, ce vecteur est généré au hasard. Par conséquent, la même clé effective est produite relativement souvent pour différents paquets. En écoutant et en observant suffisamment longtemps, il est possible de déterminer la clé WEP, une faille exploitée par les outils de cracking.

WEP2, l'évolution de la méthode WEP, utilise un vecteur d'initialisation de 128 bits et un renouvellement périodique de la clé WEP, qui était auparavant constante. Or, cette apparente amélioration ne s'avère guère plus sûre et a donc déjà été abandonnée.

WEPplus est une version plus sûre, mais propriétaire. La meilleure résistance de cette méthode de cryptage s'explique par le recours à un algorithme de génération de clés qui évite les clés faibles. Il est donc plus laborieux de casser la clé en écoutant le canal radio. La mise à disposition de l'outil logiciel permettant de le faire n'est toutefois qu'une question de temps. WEPplus est totalement rétrocompatible avec la clé WEP-WLAN.

Développée par RSA Data Security, l'inventeur du RC4, la solution *Fast Packet Keying* repose sur un principe similaire. Cet algorithme crée pour chaque paquet de données une clé de paquet d'une longueur de 104 bits et un vecteur d'initialisation de 24 bits. Ce procédé permet d'éviter l'utilisation répétée d'une clé avec le même vecteur d'initialisation, ce qui constitue l'un des principaux problèmes de la méthode WEP. La solution *Fast Packet Keying* est également compatible avec le matériel WLAN existant et supporte les mises à jour du pilote et du logiciel.

A l'heure actuelle, IPSec est l'une des solutions les plus prometteuses. Il s'agit d'un protocole TCP/IP crypté avec lequel le trafic des données sur le réseau se fait exclusivement au moyen du protocole IP. Dans la plupart des cas, cela ne pose aucun problème car, compte tenu de la diffusion de l'internet, le protocole TCP/IP est devenu omniprésent. IPSec est l'une des méthodes de cryptage les plus sûres, mais elle exige une configuration minutieuse et compliquée. Malheureusement, de toutes les procédures, c'est aussi celle qui engendre le plus d'informations supplémentaires placées dans l'en-tête de chaque paquet transmis, ce qui altère le débit de transmission.

Au niveau de l'accès au réseau, en plus des algorithmes de cryptage, les autres mécanismes de sécurité comme l'enregistrement au moyen du nom d'utilisateur et du mot de passe, le compte de l'ordinateur (identification d'un PC par son adresse MAC) et les caractéristiques de sécurité du domaine sont actifs. Aucun système de sécurité, pris isolément ou combiné, ne garantit une protection absolue.

4.2 Compatibilité électromagnétique et environnement

En principe, l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI¹) s'applique aussi aux réseaux sans fil. En revanche, elle ne s'applique pas aux installations émettrices ayant une puissance apparente rayonnée (ERP) de moins de 6 W. Etant donné que les réseaux WLAN ont une PAR de moins de 6 W, ils ne sont pas concernés par l'ORNI.

5 Normes utilisées

5.1 WLAN basé sur la norme DECT

Une solution simple consiste à utiliser la norme DECT pour raccorder les usagers sans fil. Eprouvée depuis de nombreuses années, cette norme est aussi robuste que performante. En outre, elle soutient le transfert entre les stations de base, pour autant que celles-ci soient reliées par un câble.

Le protocole DPRS (DECT Packet Radio Service) autorise des débits de données par intervalle de temps allant jusqu'à 76,8 kbit/s (bruts) pour une modulation robuste et jusqu'à 460,8 kbit/s (bruts) pour une modulation de meilleure qualité. Il est possible de combiner jusqu'à 11 intervalles de temps par direction de liaison, ce qui permet d'obtenir des débits maximaux allant jusqu'à 844,8 kbit/s (bruts) pour une modulation simple et jusqu'à 5,07 Mbit/s (bruts) pour une modulation de meilleure qualité.

5.2 WLAN selon la norme IEEE 802.11

Créée en 1997 par l'IEEE, la norme IEEE 802.11 autorise un débit de transmission de données de 1, resp. 2 Mbit/s. Elle travaille dans la bande de fréquences ISM des 2,4 GHz (2400 – 2483,5 MHz), qui dispose de 79 canaux avec chacun 1 MHz de largeur de bande.

Avec le système d'étalement de spectre par saut de fréquence (FHSS), l'un de ces canaux est brièvement occupé (quelques ms), puis la communication se poursuit sur un autre canal. L'émetteur et le récepteur doivent occuper les canaux de manière synchronisée selon un tableau donné.

Cette même norme comprend aussi une procédure avec un étalement de la largeur de bande du signal 11 fois plus élevé. Cette procédure d'étalement de spectre à séquence directe (DSSS) répartit sur 22 MHz l'énergie utilisée pour la transmission de l'information. Plusieurs liaisons peuvent alors se dérouler simultanément sur le même canal. Pour ce type de procédure, 13 fréquences porteuses avec un écart entre les canaux de 5 MHz sont à disposition dans la gamme de fréquences des 2400 – 2483,5 MHz.

Pour garantir l'exploitation sans faille de plusieurs réseaux WLAN au même endroit, il ne faudrait occuper par exemple que les canaux 1, 7 et 13, de sorte à éviter tout chevauchement.

5.3 WLAN selon la norme 802.11b

En 1999, la modification du type de modulation a permis d'élever le débit à 5,5, respectivement 11 MBit/sec. Ces réseaux WLAN ne travaillent que dans la bande des 2,4 GHz. L'augmentation du débit est obtenue grâce à l'utilisation du procédé de modulation du signal numérique basé sur le codage de bits CCK (Complementary Code Keying), un code d'étalement de valeur complexe. Ce processus s'accompagne d'une réduction de la portée du signal. Les débits de transmission définis dans la norme IEEE 802.11 sont également supportés.

¹ http://www.admin.ch/ch/f/sr/c814_710.html

En cas de débits de transmission élevés, la norme IEEE 802.11b travaille exclusivement avec la procédure DSSS.

5.4 WLAN selon la norme 802.11g

C'est sous ce nom qu'une extension de la norme 802.11b a été élaborée. Cette norme permet d'atteindre au maximum 54 Mbit/s dans la bande ISM des 2,4 GHz.

Les débits supérieurs sont atteints grâce à l'extension de l'interface radio (PHY) à deux modes de modulation/codage. L'extension porte le nom de *Extended-Rate-PHY (ERP)*. Les nouveaux modes de modulation/codage sont les suivants:

- ERP-PBCC: Les données utiles sont codées à l'aide d'un code convolusionnel à 256 états, puis modulées avec 8-PSK. En outre, la durée du préambule et de l'en-tête est raccourcie, ce qui donne des débits binaires bruts de 22 et 33 Mbit/s dans ce mode.
- DSSS-OFDM: Ce type de modulation est un hybride entre DSSS et OFDM. Comme pour la norme IEEE 802.11b, le préambule et l'en-tête raccourcis sont modulés en mode BPSK et étalés par DSSS. Les données utiles sont modulées par OFDM sur 48 sous-porteuses. Suivant le débit, les sous-porteuses sont modulées avec BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM. Une variation du taux de code (1/2, 2/3 ou 3/4) et du mode de modulation des sous-porteuses permet d'obtenir des débits binaires bruts de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ou 54 Mbit/s (voir aussi chap. 9.3)

La norme IEEE 802.11g est compatible avec des appareils fonctionnant selon les normes IEEE 802.11 et IEEE 802.11b. En outre, les paramètres OFDM sont adaptés à ceux des systèmes WLAN dans la bande des 5 GHz, ce qui rend possible la fabrication de chipsets WLAN soutenant les bandes des 2,4 et des 5 GHz.

5.5 Bluetooth

Derrière l'appellation Bluetooth se cache la norme IEEE 802.15.1. La technologie Bluetooth permet de couvrir de petites distances (jusqu'à 10 m pour 0 dBm EIRP et jusqu'à 100 m pour 20 dBm EIRP), avec des débits allant jusqu'à 1 Mbit/s. Il existe trois niveaux de performance des appareils, soit 0, 4 et 20 dBm (1, 2, 5 et 100 mW). Les appareils Bluetooth sont en général utilisés dans un réseau local personnel sans fil (WPAN ou PAN). Un PAN comprend la somme des appareils connectés sans fil (téléphone mobile, agenda électronique, ordinateur portable, imprimante, appareil photos, projecteur, etc.) à proximité immédiate d'une personne. Le but consiste à simplifier la connexion des appareils susmentionnés.

Les communications par Bluetooth sont des liaisons point à point performantes et robustes, dont plusieurs peuvent être actives simultanément. Des connexions à sauts multiples sont même imaginables, qui élargissent l'étendue locale d'un PAN grâce à l'utilisation d'appareils intermédiaires comme répéteurs.

Contrairement au WLAN, qui autorise un accès nomade au réseau d'entreprise ou à l'internet, la technologie Bluetooth est pensée comme un adaptateur universel sans fil (p. ex. interface série), dont le pendant filaire serait l'interface USB. Les premiers produits sont les casques sans fil pour les téléphones mobiles ainsi que les raccordements d'imprimantes et de caméras vidéo aux PC et aux ordinateurs portables.

La technologie Bluetooth a été optimisée en particulier pour consommer moins d'énergie. Vu que, comme les normes IEEE 802.11 / IEEE 802.11b, elle travaille dans la bande ISM des 2,4 GHz, les systèmes peuvent se perturber mutuellement. Plus le trafic augmente, plus la capacité diminue, un inconvénient dont il faut tenir compte dans les gammes non soumises à concession.

5.6 WLAN selon la norme IEEE 802.11a

Les réseaux WLAN selon la norme IEEE 802.11a travaillent dans la bande des 5 GHz. Ils offrent des débits de transmission de 6 Mbit/s à 24 Mbit/s, au besoin jusqu'à 54 Mbit/s. L'écart entre les canaux

s'élève à 20 MHz. La norme prévoit deux bandes de fréquences dans la bande des 5 GHz, avec différentes puissances d'émission (voir aussi chap. 6).

Afin que les points d'accès aux réseaux WLAN en Europe puissent utiliser toute la bande des 5 GHz, ils doivent reconnaître les signaux d'autres systèmes radio dans cette bande et les éviter en changeant de fréquence. Il convient donc d'équiper ces points d'accès de fonctions autorisant un changement dynamique de fréquence ([Dynamic Frequency Selection](#) - DFS) et une régulation de la puissance d'émission (Transmit Power Control - TPC). Réduire la puissance d'émission de moitié constitue une alternative à la fonction TPC.

Les réseaux WLAN selon la norme IEEE 802.11a sont malheureusement dépourvus de ces deux caractéristiques. L'utilisation de systèmes selon cette norme est malgré tout possible en Europe avec certaines restrictions. Vous trouvez des informations détaillées à ce sujet auprès de l'OFCOM².

S'agissant des réseaux WLAN selon la norme IEEE 802.11h (voir chapitre suivant), ces manques ont été comblés.

5.7 WLAN selon la norme IEEE 802.11h

La norme correspond très largement à la norme IEEE 802.11a (voir chap. 5.6) et travaille dans la bande des 5 GHz. Les fonctions DFS et TPC sont ici implémentées. Cette norme peut donc être utilisée en Europe.

5.8 WLAN selon la norme IEEE 802.11n

Cette norme est utilisée aussi bien dans la bande des 2,4 GHz que dans celle des 5 GHz. La plupart des appareils bon marché ne fonctionnent cependant que dans la bande des 2,4 GHz. Les fonctions DFS et TPC étant implémentées dans la bande des 5 GHz, l'emploi de cette norme en Europe ne pose aucun problème.

La norme comprend les réseaux WLAN avec des débits binaires bruts allant jusqu'à 600 Mbit/s, obtenus grâce à l'utilisation du système MIMO 4 x 4 (système à entrées multiples et à sorties multiples), une modulation 64-QAM et une largeur de bande de 40 MHz (voir aussi chap. 9.3 en annexe). En pratique, avec une bonne liaison radio, on n'atteint toutefois que la moitié du débit.

Comme son nom l'indique, le système MIMO suppose l'utilisation de plusieurs antennes aussi bien au point d'accès qu'au terminal mobile. Un système MIMO 4 x 4 comprend 4 antennes à l'émetteur et 4 antennes au récepteur. Chaque antenne permet de transmettre des flux de données différents sur la même fréquence et pour la même communication. Au niveau de la réception, les signaux peuvent être décodés à l'aide d'algorithmes compliqués. Si l'on double le nombre d'antennes des deux côtés d'une liaison radio, il est théoriquement possible de doubler le débit, sans ressources supplémentaires en fréquences et sans puissance d'émission additionnelle.

Le recours au système MIMO avec la norme IEEE 802.11h ajoute une dimension de plus à celles de la fréquence et de la durée: la dimension spatiale. On parle donc également de multiplex spatial.

Par ailleurs, avec un système MIMO, au lieu d'augmenter le débit, on peut améliorer le rapport signal/bruit et donc la qualité de la liaison radio. En émettant le même signal codé sur plusieurs antennes, il est possible d'améliorer considérablement la qualité du signal aux bords des cellules, avec la même puissance totale d'émission de toutes les antennes (gain de diversité), sans toutefois augmenter le débit de données. La portée s'en trouve accrue.

Le système MIMO offre une troisième possibilité, à savoir la formation de faisceaux. La puissance d'émission est groupée et retournée en direction du récepteur. Il en découle un accroissement de la portée et une diminution des perturbations affectant les autres usagers.

² <https://www.bakom.admin.ch/bakom/fr/page-daccueil/appareils-et-installations/acces-au-marche-a-partir-du-13-juin-2016.html>

5.9 WLAN selon la norme IEEE 802.11ac

La norme 802.11ac est une évolution de la norme IEEE 802.11n. Les systèmes MIMO jusqu'à 8 x 8 sont possibles avec cette norme et la modulation a été étendue à 256-QAM. La largeur de bande maximale atteint 160 MHz.

Cette norme peut travailler tant dans la bande des 2,4 GHz que dans celle des 5 GHz. Des débits binaires bruts allant jusqu'à 6'933 Mbit/s sont théoriquement possibles (voir annexe 9.3), en utilisant un système MIMO 8 x 8, une modulation 256-QAM et une largeur de bande de 160 MHz. Dans la pratique, avec une bonne liaison radio, on ne peut toutefois véritablement exploiter qu'une fraction de ces débits.

Il manque en général aux réseaux WLAN selon la norme IEEE 802.11ac les fonctions DFS et TPC prescrites dans toute l'Europe (voir chapitre 5.6). Dès lors, dans la bande des 5 GHz, ces systèmes ne sont autorisés que sur certains canaux. Vous trouvez des informations détaillées à ce sujet auprès de l'OFCOM³.

5.10 WLAN selon la norme IEEE 802.11ad

Egalement appelée Wireless Gigabit – WigiG –, la norme IEEE 802.11ad autorise des liaisons point à point rapides. Les réseaux WLAN fonctionnant selon la norme IEEE 802.11ad sont exploités dans la gamme de fréquences des 60 GHz. Les fréquences d'émission étant élevées, les signaux sont fortement atténués sur les interfaces sans fil. Pour cette raison, et vu la puissance d'émission relativement faible, la portée n'atteint qu'environ 10 mètres avec cette norme. En outre, il doit y avoir un contact visuel entre l'émetteur et le récepteur. Pour de plus grandes distances, la communication passe automatiquement à une norme avec un débit réduit dans la gamme des 2,4 ou des 5 GHz.

Sur l'un des quatre canaux radio large d'environ 2 GHz, il est possible d'atteindre, selon la distance, des débits de 385 à 4'620 Mbit/s bruts (mode porteuse unique) ou de 693 à 6'757 Mbit/s bruts (OFDM).

La norme soutient une formation de faisceaux performante. Les fréquences élevées utilisées ici conviennent bien, vu que de nombreuses antennes peuvent être installées sur une petite surface. Cela permet de diriger la puissance d'émission de manière ciblée vers le récepteur correspondant et de minimiser les interférences dans les systèmes voisins (voir aussi chap. 5.8).

5.11 WLAN selon la norme IEEE 802.11ah

Adaptée à des applications IoT (INternet of Things), la norme IEEE 802.11ah est conçue pour une faible consommation d'énergie, une portée relativement grande et une faible bande passante (faibles débits). Cette nouvelle norme permettrait de relier des appareils qui fonctionnent par exemple avec des batteries, qui n'envoient pas constamment des données et qui n'ont pas besoin de débits de transmission élevés. Cette technologie entre donc en concurrence avec des technologies comme Bluetooth ou Zigbee. La WiFi Alliance a adopté la norme IEEE 802.11ah et lui a donné le nom de "HaLow".

En Europe, HaLow travaille dans la gamme de fréquences des 863 – 870 MHz. La norme prévoit des bandes passantes de transmission de 1 à 2 MHz. En option, 4, 8 et 16 MHz peuvent être utilisés; cependant, en raison des largeurs de bande disponibles dans les bandes libres de concession, les bandes passantes de 8 et 16 MHz ne peuvent être exploitées qu'aux Etats-Unis et en Chine. Dans les liaisons montantes et descendantes, les débits oscillent entre 150 kbit/s et 346,6 Mbit/s. A l'extérieur des bâtiments, des portées allant jusqu'à 1 km sont possibles.

³ <https://www.bakom.admin.ch/bakom/fr/page-daccueil/appareils-et-installations/acces-au-marche-a-partir-du-13-juin-2016.html>

5.12 LTE

Depuis quelques années, la norme de téléphonie mobile LTE s'est rapidement élargie, si bien qu'aujourd'hui, les appareils en relevant peuvent être utilisés non seulement pour la communication mobile de données dans les bandes avec concession, mais aussi pour la transmission de données sur de courtes distances dans les bandes ne nécessitant pas de concession. Il est ainsi possible, au besoin et sans entraver la transmission de données, de commuter automatiquement un téléphone portable LTE sur une transmission WLAN ou d'activer une transmission WLAN. Avec cette évolution de la norme LTE, dans le cadre de la collaboration 3GPP, la LTE a été dotée des capacités suivantes:

- **LTE-License Assisted Access (LTE-LAA):** cette technologie permet de tirer profit de la propriété de la LTE grâce à laquelle la transmission de données est répartie en même temps sur plusieurs bandes de fréquences. Le trafic passe ainsi toujours par une cellule radio primaire, qui travaille dans la bande avec concession, et une cellule radio secondaire, qui utilise la bande de fréquences des 5 GHz libre de concession, avec une bande passante de transmission maximale de 20 MHz. Une distinction est faite entre le mode d'exploitation "supplemental downlink", où seule la capacité de la liaison descendante est accrue grâce à l'usage du spectre des 5 GHz, et le mode "carrier aggregation", où cette augmentation concerne la capacité tant de la liaison montante que de la liaison descendante. Les paramètres de la liaison radio pour la cellule primaire et la cellule secondaire sont en principe identiques. Seule l'interface aérienne de la cellule radio secondaire exige des capacités supplémentaires pour être compatible avec la bande des 5 GHz des systèmes déjà existants. Dès lors, à l'instar de tous les autres WLAN, l'émetteur de la cellule secondaire ne peut envoyer des signaux radio que lorsqu'il est garanti que le canal radio n'est pas occupé par un autre système.
- **LTE-WLAN Aggregation (LTE-LWA):** il s'agit d'une spécification qui, comme la LTE-LAA, transmet des données en exploitant non seulement des fréquences dans les bandes avec concession, mais aussi des fréquences dans la bande non soumise à concession des 5 GHz. Le téléphone mobile utilise directement des signaux provenant des points d'accès WLAN à 5 GHz. A l'avenir, avec la finalisation du 3GPP rel 14, les appareils LTE seront spécifiés de telle manière que, outre les signaux dans la bande des 5 GHz, des signaux de la bande des 60 GHz puissent également être employés. Pour la LTE-WLAN, de même que pour la LTE-LAA, parallèlement à une liaison par la cellule radio secondaire, une liaison par une cellule radio primaire est toujours nécessaire, soit une liaison dans une bande de fréquences avec concession.

Hormis les efforts consentis dans le cadre du 3GPP par rapport aux extensions LTE pour l'exploitation dans les bandes sans concession, les entreprises promeuvent, dans d'autres consortiums, le développement de systèmes basés sur la LTE dans des bandes sans concession. MultiFire est une norme qui prévoit des tels systèmes sans qu'une liaison par une cellule radio LTE primaire dans une bande soumise à concession soit nécessaire.

6 Normes, fréquences et puissances d'émission pour les réseaux WLAN en Suisse

En Suisse, les réseaux sans fil qui remplissent les normes suivantes peuvent être exploités:

- DECT
- Dans la bande des 2,4 GHz, tous les appareils qui respectent la norme EN 300 328-2, par exemple IEEE 802.11, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g

- Dans la bande des 5 GHz, tous les appareils qui respectent la norme EN 301 893 et qui relèvent de la ERC/DEC(04)08⁴ (voir Decides 1. – 6.). Par exemple IEEE 802.11h et IEEE 802.11n, mais aussi, avec certaines mesures, IEEE 802.11a et IEEE 802.11ac.
- Bluetooth

Les gammes de fréquences devenues libres et non soumises à concession pour les systèmes WLAN se trouvent dans les bandes de fréquences des 800 MHz, 2,4 GHz, 5 GHz et 60 GHz, où il n'existe aucune protection contre les perturbations. Les gammes de fréquences et les puissances d'émission suivantes sont à disposition en Suisse pour les systèmes WLAN:

Bande de fréquences	Gamme de fréquences	EiRP max. [mW]
2,4 GHz (bande ISM)	2400 – 2483.5 MHz;	100
5 GHz	5150 - 5350 MHz ^{a)}	200
5 GHz	5470 - 5725 MHz;	1'000
60 GHz	57 - 66 GHz	20/MHz, max. 10'000
800 MHz	863 - 868 MHz;	25

- a) Réseaux WLAN selon la norme EN 301 893 et limités aux applications à l'intérieur (indoor use).

Les prescriptions techniques d'interfaces définissent l'une des conditions pour l'accès au marché d'installations de radiocommunication. Elles décrivent la caractéristique de fréquence et les paramètres radio, ainsi que les procédures de mesure autorisées. Pour les réseaux WLAN, les prescriptions techniques d'interface RIR1010⁵ sont contraignantes.

Des antennes avec directivité pour les réseaux WLAN sont disponibles sur le marché ou fabriquées par les particuliers. Elles peuvent servir à réduire les interférences mutuelles de divers systèmes ou de cellules voisines, ce qui permet d'augmenter la portée ou le débit de données. L'exploitation d'une installation avec ce type d'antenne n'est toutefois permise que si la puissance maximale d'émission EiRP n'excède pas les valeurs figurant dans le tableau ci-dessus. L'utilisateur de l'installation est tenu de veiller à ce que les dispositions en vigueur soient respectées (EiRP, à l'intérieur pour 5 GHz, etc.). Dans la pratique, cela signifie que la puissance d'émission doit être réduite lorsqu'une antenne directive est employée.

6.1 Les ERC/DEC(04)08 en un coup d'œil

Le tableau suivant indique les exigences en matière d'appareils WLAN telles que formulées dans la décision européenne ERC/DEC(04)08.

⁴ <http://www.erodocdb.dk/doks/doccategoryECC.aspx?doccatid=1>

⁵ <https://www.ofcomnet.ch/api/rir/1010>

Frequency range	5150 - 5250 MHz;	5250 - 5350 MHz;	5470 - 5725 MHz;
Indoor or Outdoor use	Indoor only	Indoor only	Indoor and Outdoor
Max. mean EIRP	200 mW	200 mW	1000 mW
Max. mean EIRP density	10 mW in any 1 MHz	10 mW in any 1MHz	50 mW in any 1 MHz
Required standard compliance	EN 301 893	EN 301 893	EN 301 893
TPC or 3 dB power reduction required	no	yes	yes
DFS complying with ITU-R M.1652 Annex 1	no	yes	yes
Uniform random channel selection	yes	yes	yes

7 Interfaces radio WLAN

Le tableau ci-dessous donne un aperçu des interfaces radio des systèmes WLAN.

Standard	Frequency-range (GHz)	Number of channels	Bandwidth (MHz)	PHY Datarate (/s)	Modulation	Spreading	Channel access	max. Transmit power (mW EIRP)	Rang (m)
DECT	1.88 - 1.90	10	0.864 (3dB)	0.8448 (GFSK) ⋮ 5.07 (64-QAM)	GFSK (B·T=0.5) π/2-DBPSK π/4-DQPSK ⋮ 16-QAM 64-QAM	no spreading	TDMA/FDM	250	300
Bluetooth	2.4 - 2.4835	79	1	1	GFSK	FHSS	TDD/FH	1 / 2.5 / 100	2 - 100
IEEE 802.11	2.4 - 2.4835	79	1	1	2-level-GFSK	FHSS	CSMA/CA	100	20 - 100
			1	2	4-level-GFSK				
		13	22	1	DBPSK	DSSS			
			22	2	DQPSK				
IEEE 802.11b	2.4 - 2.4835	13	22	1	DBPSK	DSSS	CSMA/CA	100	40 - 100
			22	2	DQPSK				
			22	5.5, 11	DBPSK / CCK / PBCC	DSSS			
IEEE 802.11g	2.4 - 2.4835	13	22	1	DBPSK	DSSS	CSMA/CA	100	40 - 140
			22	2	DQPSK				
			22	5.5, 11	DQPSK / CCK / PBCC				
			22	22, 33	8-PSK / ER-PBCC				
		3 / 7 ^d	22	6, 9	BPSK	DSSS / OFDM			

Standard	Frequency-range (GHz)	Number of channels	Bandwidth (MHz)	PHY Datarate (/s)	Modulation	Spreading	Channel access	max. Transmit power (mW EIRP)	Rang (m)		
			22	12, 18	QPSK						
			22	24, 36	16-QAM						
			22	48, 54	64-QAM						
IEEE 802.11a	5.15 - 5.25 ^{a)} 5.25 - 5.35 ^{a) c)}	4 a.	20	same as IEEE 802.11h	same as IEEE 802.11h	OFDM 64 subcarriers ($\Delta f = 312.5$ kHz)	CSMA/CA / TDMA/TDD	Indoors 200	40 - 120		
	5.47 - 5.725 ^{c)}	15.c						1000			
IEEE 802.11h	5.15 - 5.35 ^{a)}	8 a.	20	6, 9 ^{b)}	BPSK	OFDM 64 subcarrier ($\Delta f = 312.5$ kHz)	CSMA/CA / TDMA/TDD	Indoors 200	40 - 120		
				12, 18 ^{b)}	QPSK						
				24, 36 ^{b)}	16-QAM						
	5.47 - 5.725	11		48 ^{b)} , 54 ^{b)}	64-QAM ^{b)}			6, 9 ^{b)}		BPSK	1000
				12, 18 ^{b)}	QPSK						
				24, 36 ^{b)}	16-QAM						
				48 ^{b)} , 54 ^{b)}	64-QAM ^{b)}						
IEEE 802.11n	2.4 - 2.4835	8 x 20 MHz 4 x 40 MHz	20 40	150 (1 stream) 300 (2 streams) 450 (3 streams) 600 (4 streams)	BPSK QPSK ⋮ 64-QAM	4 x 4 MIMO OFDM 128 subcarrier ($\Delta f = 312.5$ kHz)	CSMA/CA / TDMA/TDD	100	70 - 250		
	5.15 - 5.35 ^{a)}	19 x 20 MHz)						Indoors 200			
	5.47 - 5.725	9 x 40 MHz)						1000			
IEEE 802.11ac (Gigabit WLAN)	2.4 - 2.4835	2 x 80 MHz 1 x 160 MHz	20 40 80 160	867 (1 stream) 1'733 (2 streams) 2'600 (3 streams) 3'467 (4 streams) 6'933 (8 streams)	BPSK QPSK ⋮ 256-QAM	8 x 8 MIMO OFDM 512 subcarrier ($\Delta f = 312.5$ kHz)	CSMA/CA / TDMA/TDD	100	40 - 120		
	5.15 - 5.25 ^{a)} 5.25 - 5.35 ^{a) c)}	2 x 80 MHz 1 x 160 MHz)						Indoors 200			
	5.47 - 5.725 ^{c)}							1000			
IEEE 802.11ad (Wigig)	57 - 66	4	1'830.5	385 - 4'620 (SC) 693 - 6'757 (OFDM)	SC $\pi/4$ -BPSK $\pi/4$ -QPSK $\pi/4$ -16-QAM Spread QPSK	SC 1'760 Msym/s OFDM 355 act. subcarrier	TDMA/LBT	1000	10		

Standard	Frequency-range (GHz)	Number of channels	Bandwidth (MHz)	PHY Datarate (/s)	Modulation	Spreading	Channel access	max. Transmit power (mW EIRP)	Rang (m)
					OFDM; QPSK 16-QAM 64-QAM	($\Delta f = 5.15625$ MHz)			
IEEE 802.11ah (HaLow)	863 - 868 MHz;	5 - 1 MHz; 2 - 2 MHz;	1 2	up to 8'670	BPSK QPSK ⋮ 256-QAM	OFDM 64 subcarrier ($\Delta f = 31.25$ kHz)	CSMA/CA/ TDMA/TD	25 e.r.p.	<1000
LTE-LAA	5.15 - 5.35 5.47 - 5.725	10 x 20 MHz 12 x 20 MHz	20 20	max. 100.8	QPSK 16 QAM 64 QAM	OFDM ($\Delta f=15$ kHz)	TDD / LBT	200	40-120

- a) autorisé uniquement à l'intérieur
- b) en option
- c) *en raison de l'absence des techniques de mitigation TPC et DFS (selon ERC/DEC(04)08, Decides 1.- 6. resp. EN 301 893), interdit dans toute l'Europe*
- d) se chevauchent

8 Obligation d'annoncer pour les réseaux WLAN

Quiconque fournit un service de télécommunication doit s'annoncer à l'OFCOM en tant que fournisseur de services de télécommunication (FST). L'obligation d'annoncer est fondée par la fourniture d'un service de télécommunication à des tiers. L'élément déterminant est non pas une relation client quelconque, mais un contrat sur la fourniture de prestations de télécommunication conclu entre le fournisseur et le client. Est également déterminant le partenaire contractuel qui fournit les services de télécommunication par rapport à l'utilisateur concerné.

Notre guide apporte des réponses aux questions générales sur l'obligation d'annoncer. Il figure à l'adresse internet suivante:

www.bakom.admin.ch/bakom/fr/home/telekommunikation/fernmeldedienstanbieter/meldung-als-fda.html

S'agissant des hotspots WLAN, on constate que la majeure partie de ces accès à l'internet ne constituent pas un service de télécommunication au sens du droit sur les télécommunications, vu qu'ils se limitent à la transmission dans un immeuble ou dans des immeubles adjacents. Le service de télécommunication proprement dit de l'accès à l'internet est fourni par un FST annoncé depuis l'immeuble et le point de raccordement au réseau correspondant. Par analogie, cela correspond à l'appréciation d'installations téléphoniques d'entreprises telle qu'effectuée dans le passé.

A partir du moment où une entreprise propose, dans plusieurs immeubles, des services de communication qui ne servent pas à la communication interne à l'entreprise, on est en présence d'un service de télécommunication. Il convient de souligner que le simple fait de laisser ou de garantir l'accès à la prestation d'un FST annoncé ne constitue pas une offre active. Il doit y avoir une prestation propre fournie au client pour justifier une obligation d'annoncer. Tel est le cas par exemple lorsque des succursales rassemblent les services de communication contenus dans l'offre pour des clients au sein du groupe (p. ex. chaînes hôtelières) par le biais d'infrastructures (virtuelles), pour ensuite les transmettre de manière centralisée à un FST situé à distance.

La question de l'obligation d'enregistrement visant les utilisateurs d'un hotspot WLAN public se pose souvent.

Le droit des télécommunications prévoit une obligation d'annoncer pour les services de télécommunication eux-mêmes, mais l'OFCOM n'impose pas d'obligation de s'annoncer ou de s'enregistrer pour les utilisateurs de moyens de communication.

Les fournisseurs de services de télécommunication annoncés à l'OFCOM sont en général contactés par des services du DFJP (Département fédéral de justice et police), afin d'assurer la surveillance en matière de services postaux et de télécommunications. L'OFCOM ne pouvant donner aucun renseignement à ce sujet, vous êtes priés de vous adresser aux services compétents. Vous trouverez de plus amples informations à l'adresse internet suivante: www.li.admin.ch

9 Annexe

9.1 Autres sources d'information

IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee	http://www.ieee802.org
ETSI, EP BRAN	http://www.etsi.org , http://pda.etsi.org/pda/queryform.as
OFCOM	http://www.bakom.ch
Elektronik Kompendium	http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0610051.htm

9.2 Abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
AP	Point d'accès
ARQ	Requête automatique de répétition (automatic repeat request)
ATM	Asynchron transfer mode
BER	Taux d'erreur (bit error rate)
BPSK	modulation par changement de phase (binary phase shift keying)
CCK	Complementary Code Keying
CDMA ^{a)}	Accès multiple à division de code (code division multiple access)
CEPT	Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
CSMA/CD	Carrier sense multiple access with collision detection
dB	Décibel
dBc	Décibel par rapport à la porteuse
dBm	Décibel par milliwatt
DBPSK	Modulation différentielle binaire par changement de phase (differential binary phase shift keying)
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications (téléphone sans fil numérique amélioré)
DES	Data Encryption Standard
DFS	Dynamic frequency selection
DPRS	DECT Packet Radio Service
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DS	Direct Sequence
DSSS	Etalement de spectre à séquence directe (direct sequence spread spectrum)
EiRP	Puissance isotrope rayonnée équivalente (equivalent isotropic radiated power)
ERP	Puissance rayonnée équivalente
ER-PBCC	Extended Paket Binary Convolutional Coding
ETSI	Institut européen des normes de télécommunications (European Telecommunications Standards Institute)
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex

FDMA ^{b)}	Accès multiple à répartition en fréquence (frequency division multiple access)
FEC	Forward error correction
FH	Saut de fréquence (frequency hopping)
FHSS	Étalement de spectre par saut de fréquence (frequency hopping spread spectrum)
FSK	Modulation par déplacement de fréquence (frequency shift keying; 4FSK = 4 level FSK)
FTP	File Transfer Protocol
GFSK	Global System for Mobile communications
GSM	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	Haute fréquence
NTP	Network terminaison Point
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet des objets
IP	Internet Protokoll
ISDN	Integrated Services Digital Network (réseau numérique avec intégration de services = RNIS)
ISM	Industrial, Scientific and Medical
IRA	Préposé fédéral à la protection des données et à la transparence
LAN	Local area network
LTE	Long Term Evolution (téléphonie mobile de la 3 ^e génération)
LTE-LAA	LTE-License Assisted Access
LTE-LWA	LTE-WLAN Aggregation
MAC	Media Access Control (OSI Layer 2)
MAN	Metropolitan Area Network (réseau métropolitain)
Mbit/s	Mégabit (10 ⁶ Bit) par seconde
MIMO	Multiple Input Multiple Output (antennes multiples)
m-PSK	Phase Shift Keying with m-phase states
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Private Area Network
PBCC	Packet Binary Convolutional Coding
PC	Personal Computer
PHY	Interface radio physique (OSI Layer 1)
PSTN	Public Switched Telephone Network (réseau téléphonique public commuté = RTPC)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
FR	Fréquence radio
RLAN	Radio local area network
SC	Single Carrier
SHA	Secure Hash Algorithm
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDD	Time Division Duplex

TDMA ^{c)}	Accès multiple à répartition dans le temps (time division multiple access)
TPC	Transmit Power Control
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Short Message Service
WAN	Wide Area Network
WEP	Wired Equivalent Privacy
WiFi	wireless fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)
WPAN	Wireless Private Area Network

- a) Accès multiple à division de code (CDMA); dans cette procédure, les utilisateurs reçoivent des codes. Le signal à transmettre est étalé et envoyé avec ces codes. Dans le récepteur, le signal est rassemblé avec le même code, de sorte à récupérer le signal d'origine. La largeur de bande du signal à transmettre peut être sélectionnée par l'attribution de codes correspondants. Les stations centrales et les stations d'utilisateurs émettent en continu; le signal d'émission est maintenu légèrement au-dessus du minimum absolument nécessaire.
- b) Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA); dans cette procédure, les communications sont transmises sur des fréquences séparées. La largeur de bande de chaque liaison est adaptée dynamiquement en fonction du volume de trafic. La station centrale et la station d'utilisateur émettent en continu pendant la durée de la communication.
- c) Accès multiple à répartition dans le temps (TDMA); dans cette procédure, les utilisateurs disposent d'intervalles de temps pendant lesquels ils transmettent leurs données. Pour des débits plus élevés, plusieurs intervalles de temps peuvent être combinés. La station centrale diffuse normalement en continu, la station d'utilisateur à la cadence des intervalles de temps attribués.

Outre les procédures d'accès susmentionnées, des combinaisons sont possibles, p. ex. CDMA avec TDMA.

Symbol rate [MSym/s]					12	12	13.0	14.44	27.0	30.0	13.0	14.44	27.0	30.0	58.5
MIMO	Streams	Modulation ¹⁾	Code rate	Bits/Symbol	Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)										
					Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	Bitrate [MBit/s]	
9.3 Dérivation des débits binaires (bruts) de quelques systèmes OFDM															
1 x 1 (non-MIMO)	1	1	1/2	0.5	6	6	6.50	7.22	13.5	15.0	6.50	7.22	13.50	15.00	29.3
	1	1	3/4	0.75	9	9	9.75	10.83	20.3	22.5	9.75	10.83	20.25	22.50	43.9
	1	2	1/2	1	12	12	13.00	14.44	27.0	30.0	13.00	14.44	27.00	30.00	58.5
	1	2	3/4	1.5	18	18	19.50	21.67	40.5	45.0	19.50	21.67	40.50	45.00	87.8
	1	4	1/2	2	24	24	26.00	28.89	54.0	60.0	26.00	28.89	54.00	60.00	117.0
	1	4	3/4	3	36	36	39.00	43.33	81.0	90.0	39.00	43.33	81.00	90.00	175.5
	1	6	2/3	4	48	48	52.00	57.78	108.0	120.0	52.00	57.78	108.00	120.00	234.0
	1	6	3/4	4.5	54	54	58.50	65.00	121.5	135.0	58.50	65.00	121.50	135.00	263.3
	1	6	5/6	5			65.00	72.22	135.0	150.0	65.00	72.22	135.00	150.00	292.5
	1	8	3/4	6							78.00	86.67	162.00	180.00	351.0
	1	8	5/6	6.67							86.67	96.30	180.00	200.00	390.0
2 x 2	2	1	1/2	1			13.00	14.44	27.0	30.0	13.00	14.44	27.00	30.00	58.5
	2	2	1/2	2			26.00	28.89	54.0	60.0	26.00	28.89	54.00	60.00	117.0
	2	2	3/4	3			39.00	43.33	81.0	90.0	39.00	43.33	81.00	90.00	175.5
	2	4	1/2	4			52.00	57.78	108.0	120.0	52.00	57.78	108.00	120.00	234.0
	2	4	3/4	6			78.00	86.67	162.0	180.0	78.00	86.67	162.00	180.00	351.0
	2	6	2/3	8			104.00	115.56	216.0	240.0	104.00	115.56	216.00	240.00	468.0
	2	6	3/4	9			117.00	130.00	243.0	270.0	117.00	130.00	243.00	270.00	526.5
	2	6	5/6	10			130.00	144.44	270.0	300.0	130.00	144.44	270.00	300.00	585.0
	2	8	3/4	12							156.00	173.33	324.00	360.00	702.0
2	8	5/6	13.33							173.33	192.59	360.00	400.00	780.0	
3 x 3	3	1	1/2	1.5			19.50	21.67	40.5	45.0	19.50	21.67	40.50	45.00	87.8
	3	2	1/2	3			39.00	43.33	81.0	90.0	39.00	43.33	81.00	90.00	175.5
	3	2	3/4	4.5			58.50	65.00	121.5	135.0	58.50	65.00	121.50	135.00	263.3
	3	4	1/2	6			78.00	86.67	162.0	180.0	78.00	86.67	162.00	180.00	351.0
	3	4	3/4	9			117.00	130.00	243.0	270.0	117.00	130.00	243.00	270.00	526.5
	3	6	2/3	12			156.00	173.33	324.0	360.0	156.00	173.33	324.00	360.00	702.0
	3	6	3/4	13.5			175.50	195.00	364.5	405.0	175.50	195.00	364.50	405.00	789.8
	3	6	5/6	15			195.00	216.67	405.0	450.0	195.00	216.67	405.00	450.00	877.5
	3	8	3/4	18							234.00	260.00	486.00	540.00	1'053.0
3	8	5/6	20							260.00	288.89	540.00	600.00	1'170.0	
4 x 4	4	1	1/2	2			26.00	28.89	54.0	60.0	26.00	28.89	54.00	60.00	117.0
	4	2	1/2	4			52.00	57.78	108.0	120.0	52.00	57.78	108.00	120.00	234.0
	4	2	3/4	6			78.00	86.67	162.0	180.0	78.00	86.67	162.00	180.00	351.0
	4	4	1/2	8			104.00	115.56	216.0	240.0	104.00	115.56	216.00	240.00	468.0
	4	4	3/4	12			156.00	173.33	324.0	360.0	156.00	173.33	324.00	360.00	702.0
	4	6	2/3	16			208.00	231.11	432.0	480.0	208.00	231.11	432.00	480.00	936.0
	4	6	3/4	18			234.00	260.00	486.0	540.0	234.00	260.00	486.00	540.00	1'053.0
	4	6	5/6	20			260.00	288.89	540.0	600.0	260.00	288.89	540.00	600.00	1'170.0
	4	8	3/4	24							312.00	346.67	648.00	720.00	1'404.0
4	8	5/6	26.67							346.67	385.19	720.00	800.00	1'560.0	
8 x 8	8	2	1/2	8.00							104.0	115.56	216.00	240.00	468.0
	⋮	⋮	⋮	⋮							⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	8	8	5/6	53.33							693.3	770.37	1'440.0	1'600.0	3'120.0
1)	1: BPSK														
	2: QPSK														
	4: 16-QAM														
	6: 64-QAM														
	8: 256-QAM														
														18/19	