

La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil

Philippe Ciblat, Alain Sibille

▶ **To cite this version:**

Philippe Ciblat, Alain Sibille. La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil. Annales des Mines - Enjeux Numériques, 2020. hal-02916229

HAL Id: hal-02916229

https://telecom-paris.hal.science/hal-02916229

Submitted on 17 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La couche physique : un élément-clé des réseaux sans fil

Par **Philippe CIBLAT** et **Alain SIBILLE**
Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris

Introduction

Le succès des réseaux sans fil depuis les années 1990 repose largement sur la technologie numérique et sur le concept de réseau cellulaire, qui permet une utilisation efficace de la ressource spectrale tenant compte des lois fondamentales de l'électromagnétisme. Cette utilisation a énormément progressé depuis quarante ans, grâce à la mise à disposition de plus en plus de spectre, en relation avec une grande diversification des usages.

Le présent article se concentre sur la « couche physique » du « modèle OSI » [ROLI2016], modèle sur lequel l'architecture des réseaux est fondée depuis les années 1970. La couche physique s'intéresse à la transmission et à l'émission des signaux issus du monde physique dans le milieu de propagation au travers d'une antenne, ainsi qu'à l'opération inverse en réception. Les caractéristiques de la couche physique sont en effet déterminantes pour la performance des réseaux sans fil, conditionnant la couverture des territoires comme la capacité à assurer un service donné.

Les fondamentaux des communications radio

Les bases de la théorie des communications ont été posées en 1949 par Claude Shannon dans *The Mathematical Theory of Communication* [SHAN1949]. Cet ouvrage contient en particulier la formule reliant la capacité C (en bits/s) au rapport entre la puissance reçue P_r et la puissance de bruit P_{bruit} (où $P_{bruit} = B.N_0$ dans le cas du bruit thermique fondamental de densité spectrale de puissance N_0), pour une largeur de bande de fréquences B donnée :

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_r}{P_{bruit}}\right)$$

Sauf en ultra large bande, cette formule fait apparaître **une quasi-proportionnalité entre la capacité et la largeur de bande**, ce qui explique pourquoi, depuis plusieurs décennies, la tendance générale est de dégager du spectre disponible pour les réseaux sans fil. La deuxième observation essentielle est que la capacité ne varie que de façon logarithmique avec P_r, ce qui veut dire qu'il est vain d'augmenter énormément la puissance transmise P_t (donc aussi la puissance reçue), mais aussi, en sens inverse, qu'une diminution importante de la puissance ne veut pas dire une diminution énorme de la capacité. C'est lorsqu'on est « en bord de cellule » que la capacité s'effondre et la qualité de la liaison également.

On arrive maintenant à l'équation des télécommunications, reliant P_r à P_t, pour une fréquence F, une distance D et des antennes de « gain » G_r et G_t, c étant la vitesse de la lumière.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r \cdot G_t \cdot \left(\frac{c}{4\pi DF}\right)^2$$

On remarque que P_r varie en $1/D^2$, ce qui n'est pas une décroissance très rapide compte tenu de la lente variation de la capacité avec P_r.

Ces deux formules pointent vers les problématiques-clés des communications sans fil.

Tout d'abord il faut noter que C n'est pas un débit, mais **le débit maximal possible pour une communication sans erreur**. Il faut donc approcher au mieux « l'efficacité spectrale » réelle (en bits/s/Hz) de sa valeur théorique maximale C/B, de façon à exploiter au mieux cette ressource naturelle rare. Cela passe par la manipulation des signaux binaires et leur émission dans l'air, puis l'opération inverse. Or, compte tenu du bruit, mais aussi des interférences d'origines diverses qui s'y ajoutent, les signaux binaires naturellement reçus sont entachés d'erreurs occasionnelles. Plutôt que d'augmenter sans fin la puissance, **il est bien préférable d'utiliser des « codes correcteurs »** qui savent détecter et traiter ces erreurs. Ce qu'on appelle « codage canal » fait ainsi partie des grands domaines de recherches en communications, depuis Shannon [SHAN1949]. Il est aussi nécessaire de bien répartir les bits à transmettre sur les diverses fréquences à l'intérieur de la bande B, ce qui fait l'objet **de la modulation, ou encore du choix de la forme d'onde**.



Mesures 5G réalisées à Mérignac.
©ANFR

Une autre remarque très importante est que **P_r diminue avec la fréquence comme $1/F^2$**. Cette variation est, pour le coup, très importante, elle signifie que lorsque l'on passe de 900 MHz (GSM) à 28 GHz (fréquence du domaine « millimétrique » prévue pour la 5G), la réduction est de presque 1 000 ! L'explication physique est très simple : plus on monte en fréquence, plus une antenne est petite (inversement proportionnelle à la fréquence), sa « surface de captation » varie donc comme $1/F^2$. **Cette réduction peut être contrebalancée en rendant l'antenne directive**, c'est-à-dire en la faisant « écouter » dans une direction particulière plutôt que dans toutes les directions. Il en résulte un gain de réception G_r qui augmente comme l'inverse de l'angle solide d'écoute. Par exemple, si le secteur angulaire spécifié est 10° en azimut et 6° en élévation, on récupère un peu plus que ce facteur 1 000. De plus, la même approche peut être appliquée en émission pour récupérer du gain G_t, au prix dans les deux cas d'une nécessité de pointer les antennes dans les bonnes directions. En fait, parmi les progrès réalisés dans les années 2000, se trouvent les systèmes multi-antennaires (« MIMO »), qui justement permettent d'effectuer ce pointage de façon très bien contrôlée électroniquement. C'est une des raisons de l'avènement du millimétrique pour la 5G.

Par ailleurs, entre l'antenne d'émission et celle de réception se situe le « milieu de propagation ». En espace libre c'est le vide, ou l'air en pratique, mais dans le contexte des réseaux sans fil il y a de nombreuses obstructions, à commencer par le sol mais aussi les bâtiments (en extérieur), et en intérieur tout ce que ce dernier peut contenir. La ligne droite n'est donc souvent pas possible

pour les ondes transmises, et la communication doit souvent tirer bénéfice des réflexions (murs, mobilier…) ou de la diffraction (par les bords des obstructions). Cette dernière se produit plus facilement à basse qu'à haute fréquence, domaine pour lequel l'absorption est également souvent plus forte. Il en résulte que **dans le domaine millimétrique, les obstacles ont un impact beaucoup plus gênant qu'en dessous de 6 GHz** par exemple, ce qui tend à réduire fortement la portée de la liaison radio.

Enfin, une dernière problématique importante est celle de la temporalité. En effet lorsque l'émetteur ou le récepteur se déplace, ou lorsque l'environnement de propagation fluctue fortement, on est dans le cas d'un système variant dans le temps dont le traitement doit être bien pris en compte dans la conception de la couche physique. C'est notamment plus difficile lorsque ces variations sont très rapides (exemple : TGV) ou aux fréquences élevées, ce qu'on qualifie de « Doppler » introduisant alors un mélange entre signaux qu'il faut impérativement combattre.

Les grandes évolutions de la couche physique depuis vingt ans

Bien que développé dans les années 1980 et largement utilisé dans les réseaux locaux type WIFI, **l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)** n'est utilisé dans les réseaux cellulaires que depuis la 4G. Cette technique de modulation, aujourd'hui dominante, permet de gérer facilement l'interférence entre symboles numériques créée par les rebonds du signal sur les obstacles. Elle est aussi couplée à l'accès pour de multiples utilisateurs. Jusqu'à présent, cet accès multiple a été fondé sur le principe d'orthogonalité permettant d'éviter ainsi les collisions internes à une cellule. Devant son efficacité, cette technique, avec quelques modifications mineures, est de nouveau présente dans la 5G.

Comme déjà évoqué, le MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) est une grande innovation des deux dernières décennies avec le double objectif de renforcer la fiabilité des liens par la multiplication des canaux de propagation (pourvu que les antennes soient suffisamment espacées, typiquement la longueur d'onde, ce qui est facile à réaliser au-delà du GHz) et d'augmenter fortement le débit puisque de nouveau plusieurs voies de communication sont alors utilisables en parallèle pour transmettre des données différentes. Un compromis, bien étudié dans la littérature, existe pour consacrer les voies supplémentaires soit à la fiabilité soit à l'augmentation du débit. Pour le mettre en œuvre, il convient de concevoir des codes spatio-temporels qui lient les données efficacement entre les antennes. On peut citer le code d'Alamouti, ou encore le code d'Or qui est une invention française. **Cette approche conduit naturellement au « MIMO massif »** lorsque le nombre d'antennes dépasse plusieurs dizaines. Elle permet d'augmenter fortement l'efficacité spectrale et donc de servir beaucoup plus d'utilisateurs. On peut aussi en profiter pour dédier certaines antennes à faire de la formation de voie (*beamforming*) pour focaliser l'énergie vers un utilisateur particulier. Ceci permet de procéder à de la réutilisation spectrale dans l'espace.

L'OFDMA (OFDM couplé à un accès multiple orthogonal) permet d'éviter l'interférence intracellulaire. En revanche, afin d'utiliser au mieux les ressources, les cellules utilisent depuis la 3G les mêmes fréquences et donc interfèrent entre elles, surtout à leur frontière. Par conséquent, les utilisateurs en bord de cellule peuvent subir de fortes dégradations de leur transmission. Pour y remédier, **une idée est de faire collaborer les stations de base**. C'est une grande innovation, notamment parce qu'elle dépasse l'organisation OSI classique. En effet, les couches supérieures du réseau doivent alors être mises à contribution pour que les couches physiques des deux stations de base puissent se mettre d'accord. Les techniques à utiliser sont assez différentes suivant le niveau de coopération autorisé et le type de données échangées. Si les stations de base partagent les flux de données, on aboutit au paradigme de « MIMO virtuel », pour lequel les antennes ne sont plus colocalisées. Ceci met à rude épreuve le réseau de cœur, puisque les données d'un

utilisateur doivent arriver à plusieurs stations de base simultanément. Si celles-ci ne partagent que des informations sur les canaux de propagation (ce qui est encore compliqué lorsque les deux sens de communication n'utilisent pas les mêmes fréquences), alors seulement un accord sur les puissances ou les sous-bandes utilisées est possible, aboutissant à un moindre bénéfice de cette technique. Ces solutions, déjà considérées pour la 4G mais en pratique peu utilisées, restent pertinentes pour la 5G, avec une facilitation grâce au mode TDD (*Time Division Duplex*, qui permet d'utiliser la même fréquence dans les deux sens).

Enfin, en ce qui concerne les codes correcteur d'erreur, mentionnés plus haut, les grandes avancées théoriques des années 1990 (« turbo-codes », autre invention française, codes LDPC pour *Low Density Parity Check*) en ont vu l'application dans les années 2000 dans tous les systèmes pratiques. Ceci **a permis de se rapprocher très fortement de la limite fondamentale des communications point-à-point**, donnée par la formule de Shannon [SHAN1949].

Les développements futurs en émergence

Tout d'abord, il convient de mentionner que **les systèmes de communication doivent répondre à de plus en plus d'applications ayant des qualités de service différentes** (soit ultra-haut débit, soit très faible latence, soit très économe en énergie…). Bref, chaque système ou norme doit être polyvalent et donc on verra de plus en plus, au sein d'une même norme, des gammes d'outils techniques et de fréquences très variées.

Particulièrement, en termes de bande de fréquence, il est clair que les bandes millimétriques (de 6 GHz à 60 GHz) seront prochainement mises à contribution**. Ces fréquences très élevées demandent de revoir de nombreux principes et études antérieures** car les conditions de propagation sont différentes, les récepteurs devant notamment s'appuyer sur des technologies hybrides analogique-numérique, plus réalistes que le tout-numérique à des fréquences aussi élevées.

Comme nous l'avons énoncé dans la section précédente, la coordination entre points d'accès et même entre utilisateurs doit être renforcée, notamment car les systèmes sont de plus en plus hétérogènes, avec différentes échelles de cellules (pico-, nano-, petites, micro-, macro-…), voire des communications appareil-à-appareil (*device-to-device*) ne passant pas par les stations de base, bien qu'avec leur accord.

Nous nous proposons maintenant d'exposer, de manière non exhaustive, certains problèmes et solutions que le réseau rencontre de manière croissante, étant donné les nouvelles qualités de service exigées par certaines applications :

- L'accès multiple pour des systèmes avec de plus en plus d'utilisateurs pour une même cellule, quelle que soit la taille de celle-ci, oblige à revisiter les techniques non orthogonales abandonnées en raison de leur relative inefficacité à l'époque de la 3G due à une complexité ingérable à l'époque. Ce retour en grâce sous l'appellation NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*) est rempli de promesses **grâce aux avancées technologiques et algorithmiques récentes qui ont permis la gestion de l'interférence inter-cellules** et qui vont donc permettre une gestion de l'interférence intra-cellules plus efficace.
- Pour de nombreuses applications industrielles (robotique, véhicule autonome…) ou financières (commerce à haute fréquence), la latence déterminant le temps nécessaire pour recevoir une information est cruciale. Ceci implique d'utiliser des « paquets » de bits courts. Or il est connu que ces paquets n'ont pas le comportement annoncé par la théorie de Shannon [SHAN1949], puisqu'une hypothèse fondamentale repose sur des paquets suffisamment longs. Par conséquent, de nombreux résultats ou optimisations de systèmes obtenus à partir des

formules de Shannon sont à revisiter complètement. De plus, dans le cadre de la faible latence, les « en-têtes » de « signalisation » de ces paquets, qui ne portent pas les informations des utilisateurs mais sont nécessaires, consomment une ressource qui n'est plus négligeable. **Cela soulève le problème de la conception d'une signalisation à faible coût**. Enfin, les **besoins de synchronisation sont fortement augmentés.**

- Pour les flux vidéo, notamment ceux venant des sites de partage, de fournisseurs de produits vidéo ou de la télévision en différé, le trafic a augmenté de manière exponentielle et les mêmes informations sont véhiculées très souvent, ce qui induit un engorgement inefficace du réseau. Pour y remédier, **il faut décentraliser le stockage de ces données** pour qu'elles soient au plus près de l'utilisateur, par exemple au sein des stations de base ou d'autres utilisateurs. Une solution très étudiée consiste à identifier le statut des données tout au long de la transmission et du stockage. Un premier problème est de déterminer les fichiers à stocker et où et à quelle vitesse les rafraîchir, sachant que ces vidéos ont des popularités variant dans le temps et aussi des pertinences diminuant avec le temps. Un second problème est l'encodage intelligent des données, qui intervient plutôt dans le contexte de fichiers sauvegardés dans des serveurs distants décentralisés. En découpant intelligemment les fichiers et en les mettant aux endroits propices, **de nouvelles techniques de codage permettent de diminuer fortement les exigences sur le réseau**. Néanmoins, ces concepts sont récents et ils nécessitent encore de nombreux développements dans des configurations diverses, ainsi qu'un passage à la pratique avec des codes et des modulations réalistes.

Conclusion

Le développement des réseaux sans fil n'est pas terminé, on commence ainsi à parler de réseaux 6G. Sachant qu'une génération dure environ dix ans, au moment où la génération N commence son déploiement, il faut penser à la génération N+1. Or, la couche physique reste centrale pour tous les réseaux sans fil, et même si les avancées des années 1990, avec l'atteinte de la « limite de Shannon » dans certaines conditions, voient progressivement leur mise en œuvre, la diversité des applications contemporaines rend les choses nettement plus complexes. Cela se retrouve dans l'hétérogénéité des réseaux, des besoins en qualité de service et dans les modes d'accès et l'optimisation du fonctionnement de ceux-ci. La « loi d'Edholm » [CHER2004], prévoyant une croissance exponentielle des débits très proche de la fameuse loi de Moore, s'appuie comme celle-ci sur de nombreuses innovations depuis plusieurs décennies, dont la concrétisation nécessite environ une décennie au moins pour passer du laboratoire à l'application commerciale. Cet article espère avoir montré la vivacité technologique, en partie relative à la couche physique, qui permet d'assurer cette croissance.

Références

[ROLI2016] ROLIN P., TOUTAIN L., TEXIER G., PAUL O. & CHAUDET Cl. (2016), *Les réseaux : Principes fondamentaux,* Editions Lavoisier.

[CHER2004] CHERRY S., "Edholm's Law of Bandwidth », IEEE SPECTRUM, 1er juillet 2004, disponible sur https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/edholms-law-of-bandwidth

[SHAN1949] SHANNON C. et WEAVER W., *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, 1949.