

# LES BASES DE LA RADIO

*Par Michèle Germain  
Présidente de l'atelier d'écriture de Forum ATENA*



***Ce livre blanc de la collection « Professeur ATENA » est un document d'initiation et de vulgarisation destiné à ceux qui ne sont pas des professionnels de la radio mais qui voudraient en acquérir quelques notions.***

## Un livre blanc de Forum ATENA

---

## SOMMAIRE

---

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| <b>LES BASES DE LA RADIO .....</b>                   | <b>1</b>                           |
| <b>1. QU'EST-CE QUE LA RADIO ? .....</b>             | <b>3</b>                           |
| <b>2. LA TRANSMISSION RADIO .....</b>                | <b>3</b>                           |
| 2.1. PRINCIPE D'UNE LIAISON RADIO .....              | 3                                  |
| 2.2. L'ANTENNE .....                                 | 4                                  |
| <b>3. LE TRAITEMENT DU SIGNAL .....</b>              | <b>5</b>                           |
| 3.1. LA MODULATION .....                             | 5                                  |
| 3.2. LE TRAITEMENT DES INFORMATIONS NUMÉRIQUES ..... | 6                                  |
| 3.2.1. <i>La numérisation</i> .....                  | 6                                  |
| 3.2.2. <i>Le débit du canal radio</i> .....          | 7                                  |
| 3.2.3. <i>Le codage canal</i> .....                  | 8                                  |
| 3.3. LES AUTRES MODULATIONS .....                    | 8                                  |
| 3.4. LA CHAÎNE DE TRANSMISSION .....                 | 10                                 |
| <b>4. LES CANAUX RADIO .....</b>                     | <b>10</b>                          |
| 4.1. ORGANISATION DU CANAL RADIO .....               | 10                                 |
| 4.1.1. <i>Définition du canal radio</i> .....        | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| 4.1.2. <i>Notion de canal duplex</i> .....           | 11                                 |
| 4.2. ATTRIBUTION DES CANAUX .....                    | 10                                 |
| 4.3. MULTIPLEXER LES TRANSACTIONS RADIO .....        | 11                                 |
| <b>5. LE RÉSEAU RADIO .....</b>                      | <b>12</b>                          |
| 5.1. RELAIS ET TERMINAUX .....                       | 12                                 |
| 5.2. L'INSCRIPTION .....                             | 12                                 |
| 5.3. UTILISATION DES CANAUX RADIO .....              | 13                                 |
| 5.4. LE MODÈLE CELLULAIRE .....                      | 13                                 |
| <b>6. A SUIVRE .....</b>                             | <b>14</b>                          |
| <b>7. ANNEXE : TABLEAU DES FRÉQUENCES .....</b>      | <b>15</b>                          |
| <b>8. GLOSSAIRE .....</b>                            | <b>15</b>                          |
| <b>9. BIBLIOGRAPHIE .....</b>                        | <b>16</b>                          |
| <b>10. A PROPOS DE L'AUTEUR .....</b>                | <b>16</b>                          |

---

## 1. QU'EST-CE QUE LA RADIO ?

---

Un signal radio est une onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse de la lumière. Correctement codé, ce signal peut transporter de l'information.

C'est James Clerk Maxwell qui découvrit le premier que la variation d'un champ magnétique induit un champ électrique qui induit à son tour un changement de champ magnétique et que la transition produit une onde électromagnétique. Cette découverte fut mise en pratique par Heinrich Hertz et surtout par Édouard Branly qui découvrit comment les détecter. Hertz avait fait l'émetteur, Branly le récepteur. Il ne restait qu'à inventer l'antenne, ce dont se chargea un dénommé Popov. C'est Marconi qui assembla les pièces du puzzle pour réaliser la première communication radio.

L'invention de Branly se limitant à la détection d'une onde en tout ou rien, les premières communications étaient en morse sur le mode transmission/non transmission.

Un peu plus tard, on découvrit la modulation qui permit alors de transporter un signal audio sur la radio, donc de la phonie, puis de la vidéo.



Édouard Branly (Photo ISEP)

---

## 2. LA TRANSMISSION RADIO

---

### 2.1. PRINCIPE D'UNE LIAISON RADIO

Pour établir une telle liaison il faut un émetteur et un récepteur.

L'émetteur reçoit un signal électrique qu'il convertit en signal électromagnétique, lequel est conduit vers l'antenne.

L'antenne émet le signal... dans la nature... où il peut être capté par une ou plusieurs autres antennes. Ceci constitue une différence fondamentale avec les liaisons filaires pour lesquelles un signal ne peut être reçu que par celui qui se trouve au bout du fil. En radio, le signal est diffusé partout et est donc susceptible d'être reçu par tout le monde.

L'antenne réceptrice conduit le signal reçu vers le récepteur d'où est extrait le même signal électrique que celui qui était en entrée de l'émetteur.



Principe d'émission - réception

Tout ceci mérite quelques commentaires :

- L'onde émise va s'atténuer, d'autant plus que la distance entre l'émetteur et le récepteur est grande. De ce fait, le signal électromagnétique reçu par l'antenne est très faible et doit être réamplifié au niveau du récepteur.
- L'onde radio transmise entre l'émetteur et le récepteur peut être soumise à des perturbations qui vont l'altérer. Les éléments perturbateurs peuvent être d'autres émetteurs radio, mais aussi des appareils électriques apparemment anodins, mais qui génèrent un rayonnement électromagnétique. C'est le cas notamment des appareils qui utilisent un moteur.
- L'onde radio peut rencontrer des obstacles qui vont nuire à sa propagation entre l'émetteur et le récepteur. Ces obstacles peuvent être des bâtiments, des forêts... Certains obstacles, tels les parois métalliques, sont des obstacles absolus au passage des ondes électromagnétiques.
- Les ondes radio se propagent en ligne droite, mais elles peuvent rebondir sur des obstacles, une fois, plusieurs fois... Ainsi, le signal émis pourra-t-il emprunter simultanément divers trajets et arriver en

plusieurs exemplaires au destinataire. Ces différents exemplaires se brouillent mutuellement et de trop grandes différences de délai de transmission entre plusieurs signaux reçus vont nuire à la restitution du signal transmis.

Pour mettre toutes les chances de son côté, il faudra prendre certaines précautions :

- Installation de l'antenne en hauteur car plus elle est haute, plus la portée est grande. De plus, l'installation en hauteur permet d'éviter certains obstacles
- Blinder les câbles qui conduisent le signal à l'antenne et éviter de le poser à côté de sources importantes de parasites, en particulier les ascenseurs.

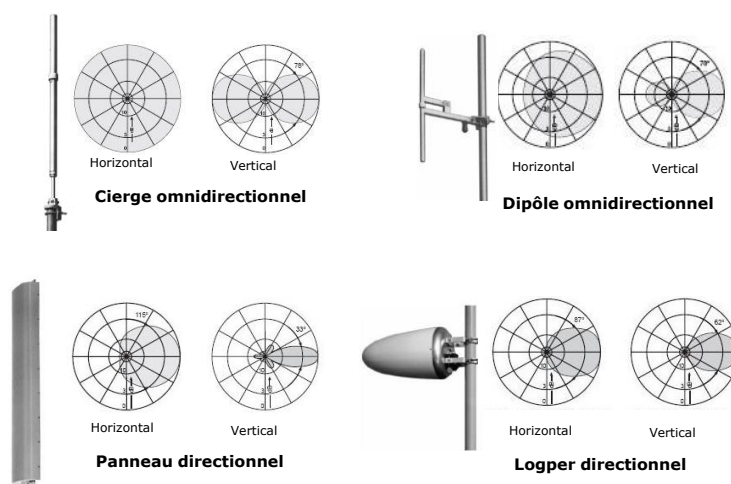
## 2.2. L'ANTENNE

Il existe différents modèles d'antennes, adaptés à différents usages.

Une antenne diffuse selon un **graphe de rayonnement** en 3 dimensions. Elle présente dans le plan vertical et dans le plan horizontal ce qu'on appelle un ou plusieurs **lobes de rayonnement**.

Les antennes peuvent être rangées en deux grandes catégories :

- Les **antennes omnidirectionnelles** diffusent de la même façon dans tous les sens. L'antenne omnidirectionnelle parfaite, dite « isotrope » n'existe pas et les antennes omnidirectionnelles s'en rapprochent du mieux qu'elles peuvent. On les utilise pour les réseaux radio et des services de radiodiffusion.
- Les **antennes directionnelles** présentent un lobe frontal principal, plus ou moins étroit. Elles servent entre autres aux liaisons hertziennes et à la couverture de vallées, routes et voies ferrées.



### Quelques modèles d'antennes

(Photos Kathrein)

L'antenne est installée sur un point haut (immeuble, château d'eau, clocher, pylône...). Son emplacement doit être judicieusement choisi afin de bien couvrir la zone désignée.

On n'installe pas l'antenne toute droite... Quand on regarde le graphe de rayonnement vertical, on voit que le signal au sol est pratiquement nul. Donc, pour avoir des chances de couvrir quelque chose au sol, on l'incline légèrement selon un angle qu'on appelle **tilt** de l'antenne. Cet angle est choisi en fonction des graphes de rayonnement vertical et horizontal afin d'offrir la plus large intersection au niveau du sol.

On utilise couramment des antennes dites sectorielles qui couvrent un angle précis, entre 90° et 120°. Les opérateurs de téléphonie mobile couplent couramment 3 antennes sectorielles 120° pour réaliser une couverture omnidirectionnelle autour du pylône. Ceci présente l'avantage d'avoir une couverture plus étendue qu'avec une antenne omnidirectionnelle, et par là de réduire le nombre de sites radio.

## 3. LE TRAITEMENT DU SIGNAL

### 3.1. LA MODULATION

Prenons un exemple simple, nous voulons transmettre un signal audio, musique ou parole.

Le signal audio se présente électriquement sous la forme d'un signal alternatif dans lequel l'amplitude représente la puissance du son et la fréquence l'aspect grave ou aigu.



Représentation électrique d'un signal audio

On peut être tenté d'envoyer ce signal tel quel vers l'antenne, ce qu'on appelle transmission en **bande de base**, mais nous n'émettrions pas très loin ainsi... et il faudrait une antenne de plusieurs centaines de kilomètres de long !

Nous allons donc émettre sur un signal haute fréquence sinusoïdal, que l'on appelle une **porteuse**. Si on n'émet que la porteuse, on n'entend rien.

La porteuse est un signal sinusoïdal pur, d'amplitude, de fréquence et de phase constantes. Cette porteuse doit être modifiée afin de transporter le signal audio que l'on veut émettre. On dit alors qu'elle est **modulée**.



Porteuse pure

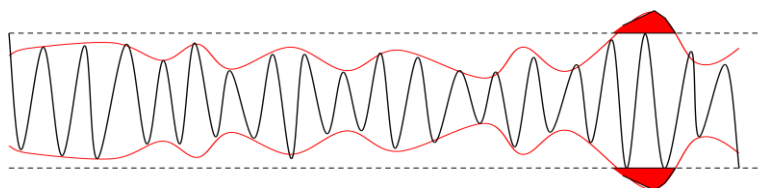
La porteuse est décrite par l'équation  $y = a \sin (2\pi Ft + \phi)$  dans laquelle :

- **a** est l'amplitude de la porteuse,
- **F** est la fréquence de la porteuse,
- $\phi$  est la phase de la porteuse.

Pour moduler la porteuse, on va modifier un de ces trois paramètres en fonction du signal à transmettre.

#### • Modulation d'amplitude

C'est la première forme de modulation qui fut utilisée, car simple à mettre en œuvre. L'amplitude de la porteuse évolue en fonction de l'amplitude et de la fréquence du signal à transmettre. La forme extérieure du signal modulé, qui rappelle celle du signal d'entrée, est appelée l'**enveloppe**. La modulation d'amplitude est une modulation à **enveloppe non constante** puisque l'amplitude du signal modulé n'est pas constante.



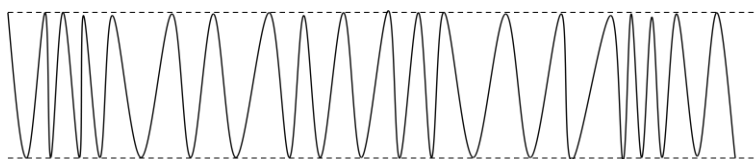
Modulation d'amplitude

Ce type de modulation présente quelques inconvénients.

- Si l'amplitude du signal à transmettre est très élevée (son très fort), l'amplitude du signal modulé va dépasser l'amplitude de la fréquence (en rouge). Comme il est impossible d'émettre au-delà de l'amplitude maximale de la porteuse, le son va être écrêté. On dit qu'il y a saturation. Une conséquence est que le signal original ne pourra pas être fidèlement restitué.
- Nous avons vu que le signal reçu de l'antenne doit être réamplifié. On dit qu'un amplificateur est linéaire si le signal amplifié est strictement proportionnel au signal reçu. Ce n'est pas toujours le cas et certains amplificateurs, surtout bon marché, infléchissent la courbe d'amplification vers le haut. Autrement dit, les signaux faibles sont plus amplifiés que les forts, ce qui revient à tasser les signaux modulés de forte amplitude. Là encore, la restitution du signal d'origine ne peut pas être fidèle.

- **Modulation de fréquence**

Ici, c'est la fréquence de la porteuse qui évolue en fonction du signal à transmettre. L'amplitude de la porteuse est constante, c'est une modulation à **enveloppe constante**, ce qui pallie de manière native les deux inconvénients cités ci-dessus.

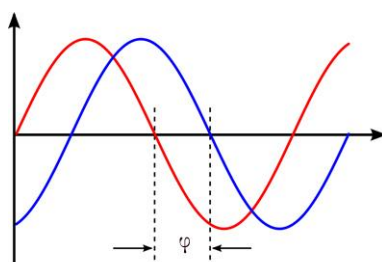


**Modulation de fréquence**

La modulation de fréquence est largement utilisée en radiodiffusion.

- **Modulation de phase**

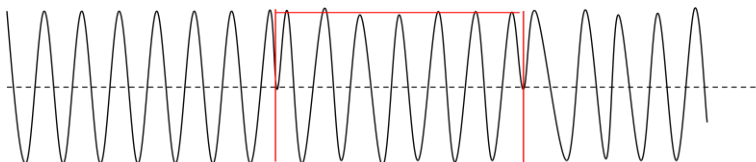
Ce petit schéma qui représente deux sinusoïdes déphasées permet de comprendre ce qu'est la phase.



**Sinusoïdes déphasées**

La modulation de phase consiste à agir sur la phase de la porteuse, en fonction du signal à émettre. C'est également une modulation à enveloppe constante, puisque l'amplitude de la porteuse n'est pas affectée.

Elle est difficile à mettre en œuvre pour des signaux audio et c'est surtout dans le domaine de la transmission de données qu'elle trouve son application. On aura par exemple un déphasage de  $\pi$  entre la transmission d'un « 0 » et celle d'un « 1 ».



**Modulation de phase**

De nouvelles formes de modulation sont apparues avec les nouvelles technologies. Nous y reviendrons un peu plus loin.

## 3.2. LE TRAITEMENT DES INFORMATIONS NUMÉRIQUES

### 3.2.1. LA NUMÉRISATION

Nous avons jusqu'ici évoqué la transmission radio de signaux analogiques, mais aujourd'hui, beaucoup de transmissions portent sur des signaux numériques binaires, composés de « 0 » et de « 1 ». Ce sont tout d'abord des signaux informatiques qui se présentent de manière native sous cette forme, mais ce sont aussi des signaux analogiques (voix, musique, vidéo, image..) qui vont être ainsi numérisés.

L'avantage de la numérisation est multiple :

- utilisation de modulations performantes comme la modulation de phase et autres modulations dérivées,
- largeur canal réduite, moins importante qu'en analogique,
- possibilité d'introduire des codes de correction d'erreur car, nous l'avons vu, la transmission radio est soumise à des aléas qui compromettent la fidélité du signal reçu par rapport à celui qui est émis.

- **Numérisation de la parole par échantillonnage**

C'est la plus ancienne méthode utilisée. Elle revient à quantifier le niveau du signal vocal en des points régulièrement espacés.

Ce procédé peut être illustré par la figure ci-dessous. Le signal est représenté par la série des petits traits verticaux placés à intervalle régulier.



Chaque échantillon est codé généralement sur 8 bits, mais un codage sur 16 bits (ou davantage), procurera une restitution plus fidèle. La qualité dépend également de la **fréquence d'échantillonnage**, en d'autres termes la distance entre deux traits consécutifs. On voit aisément que si celle-ci augmente, la représentation du signal se dégrade et peut même perdre totalement sa substance. Pour une restitution correcte, le **théorème de Shannon** démontre que la fréquence d'échantillonnage doit être le double de la fréquence maximale du signal à transmettre.

Par exemple, la parole en qualité téléphonique occupe les fréquences de 300 à 3300 Hz. On peut échantillonner à  $2 \times 3400 = 6800$  Hz. En règle générale, on va échantillonner à 8 KHz. Chaque échantillon est codé sur 8 bits, ce qui donne un **débit** de  $8 \times 8 = 64$  kbits/s.

La numérisation par échantillonnage s'applique à tout signal audio quel qu'il soit : parole, musique, bruit ambiant... cris d'animaux, etc.

- **Numérisation de la parole par vocodage**

Le besoin de réduire la largeur des canaux radio a conduit à trouver des méthodes de numérisation moins gourmandes en bande passante que la méthode par échantillonnage ci-dessus.

Le vocodeur est basé sur l'analyse spectrale de la voix et l'identification de paramètres qui la caractérisent. Ceci permet de transférer non plus la voix, mais une liste de paramètres caractéristiques qui permettent de reconstituer la voix du côté de récepteur.

Cette technique permet de réduire le débit de manière drastique : on passe des 64 kbits/s de l'échantillonnage à quelques kbits/s. Des vocodeurs modernes n'utilisent que 2,4 kbits/s.

Comme son nom l'indique, cette technique ne peut coder que la parole humaine. Elle présente l'avantage de bien isoler la parole lorsqu'une conversation a lieu en milieu bruyant et elle est largement utilisée en téléphonie mobile.

- **Numérisation d'images**

Une image peut se décomposer en une multitude de points régulièrement espacés, nommés **pixels**. A chacun de ces pixels sont associés un niveau de luminosité et un niveau correspondant aux trois couleurs fondamentales. Ces informations sont chacune codées sur 8 bits, ou davantage.

Tout ceci est à la fin assez envahissant et on met en œuvre des techniques de compression pour limiter le volume : regroupement de pixels identiques, non-transmission des parties inchangées d'une vidéo...

### 3.2.2. LE DÉBIT DU CANAL RADIO

Tout signal radio, à l'instar de tout signal électronique, est toujours entaché de « bruit », un signal de bas niveau, aléatoire qui vient se superposer au signal transporté. On utilise le ratio signal/bruit (en décibels) pour évaluer la qualité d'un signal transmis.

Sur la radio, le débit se dégrade en fonction des conditions de propagation, augmentant en même temps le rapport signal/bruit (SNR) qui est le ratio du niveau du signal que l'on veut transmettre au rapport du « bruit » sur la liaison. La capacité (en terme de débit) d'un canal radio a été définie par Shannon, encore lui, et est calculée par le théorème du même nom :

$$C = w \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$$

dans laquelle

- **C** est la capacité du canal
- **w** est la bande passante du signal émis
- **SNR** le rapport signal/bruit

Le **rapport signal/bruit** pris en compte va dépendre de la qualité souhaitée, par exemple 30dB pour le téléphone, 80 dB pour de la musique haute-fidélité.

### 3.2.3. LE CODAGE CANAL

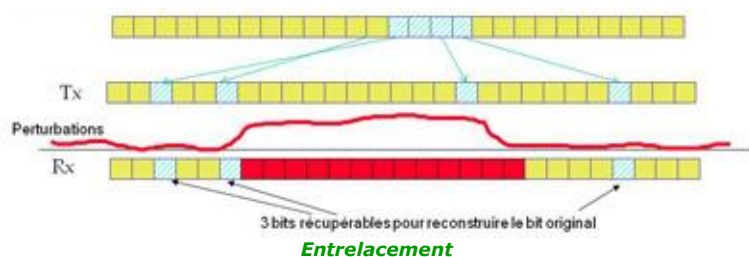
Le codage porte sur des **trames**, c'est-à-dire des blocs de longueur constante de l'information d'entrée. Une trame peut être un échantillon de parole de durée donnée, telle qu'elle sort du vocodeur. Ce peut être aussi un bloc issu d'un découpage en blocs de même longueur d'une donnée informatique ou d'une image.

Nous avons vu que les ondes radio sont exposées à des tas de désagréments et que le risque de recevoir une information erronée n'est pas nul. On estime à 27,4% la probabilité de recevoir correctement un message de 8 octets.

Pour avoir des chances de recevoir correctement quelque chose, on va procéder à un **codage** de l'information destinée à introduire de la redondance.

Pour faire simple, disons qu'un bit donné est combiné plusieurs fois avec des bits qui lui sont adjacents pour donner un nouveau bit. La trame codée est plus longue que la trame initiale. Par ce moyen, même s'il manque morceau dans la transmission, chaque bit peut être reconstitué à l'aide des combinaisons dans lesquelles il intervient.

Ceci est néanmoins un peu simpliste car chaque bit étant combiné avec ses voisins, des bits consécutifs vont se retrouver codés dans d'autres bits consécutifs de la trame codée et s'il arrive une grosse perturbation, tous vont disparaître, en même temps que la possibilité de restitution. Pour remédier à ceci, l'ordre des bits est modifié sur la trame codée, afin que des bits initialement consécutifs se retrouvent en différents emplacements de la trame. Cette opération s'appelle l'**entrelacement**.



### 3.3. LES AUTRES MODULATIONS

Nous avons vu au § 3.1 les principales formes de modulations. Nous allons nous intéresser ici aux modulations qui sont communément utilisées pour des signaux numériques.

Nous allons introduire le **baud** qui exprime le nombre de moments de modulation par seconde, soit la vitesse de modulation, chaque moment de modulation pouvant transmettre un ou plusieurs bits. Par exemple dans la modulation de phase présentée ci-dessus, un moment de modulation représente la valeur 1 ou 0.

Nous allons également introduire la notion de **symbole**. Un symbole est l'unité d'information transmise par moment de modulation. Toujours dans la modulation de phase citée ci-dessus, la longueur du symbole est de 1 bit.

Le débit de la liaison est par conséquent le produit de la vitesse de modulation en bauds et de la longueur du symbole en bit.

La largeur du canal est limitée et, de ce fait, le débit du canal également. On cherchera donc, à vitesse de modulation constante, à transporter le maximum d'information. Ceci peut se faire en modulant des symboles qui ne véhiculent plus un bit unique, mais plusieurs bits.

#### • Les modulations PSK

Les modulations PSK agissent sur la phase de la porteuse.

La forme la plus simple, **BPSK** (Binary PSK) ou PSK à deux états, est une modulation qui véhicule des symboles de 1 bit « 0 » ou « 1 » :

- 1 : la porteuse n'est pas déphasée,
- 0 : la porteuse est déphasée de  $\pi$ .

Des 1 ou des 0 consécutifs n'affectent pas individuellement la phase de la porteuse. Celle-ci ne change que sur les transitions 1/0 et 0/1.

De la BPSK à des modulations de symboles plus longs, il n'y a qu'un petit pas à franchir, qui est franchi par la modulation **QPSK** (Quadrature PSK) à quatre états :

- 11 : la porteuse est déphasée de  $\pi/4$ ,
- 01 : la porteuse est déphasée de  $3\pi/4$ ,
- 00 : la porteuse est déphasée de  $-3\pi/4$ ,



- 10 : la porteuse est déphasée de  $-\pi/4$ .

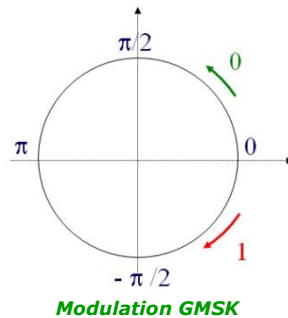
En pratique, on ne va pas beaucoup plus loin avec les PSK.

Ces modulations, comme toutes les modulations de phase, sont à enveloppe constante, donc n'exigent pas des amplificateurs bien linéaires en réception du signal puisque la composante amplitude n'a aucune importance, ce qui simplifie la conception matérielle des composants électroniques de l'émetteur.

- **La modulation GMSK**

C'est une des plus anciennes, largement utilisée en téléphonie mobile. Elle est dérivée des modulations PSK et agit sur la phase de la porteuse.

Pour transmettre un « 0 » on décale la phase de la porteuse de  $+\pi/2$ . Pour transmettre un « 1 » on décale la porteuse de  $-\pi/2$ . La longueur du symbole est donc de 1 bit et la vitesse de modulation en bauds est égale au débit en kbits/s.



Contrairement à la PSK, chaque « 1 » ou « 0 » consécutif applique un déphasage nouveau de la porteuse. Ainsi pour la séquence 0010, la phase de la porteuse (partant de 0) sera successivement  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ .

N'agissant que sur la phase, c'est aussi une modulation à enveloppe constante.

- **Les modulations QAM**

Les modulations QAM associent modulation de phase et modulation d'amplitude pour former des symboles de plus grande longueur.

Le flux d'entrée D est divisé en deux parties. La première  $d_1$  est modulée en amplitude :

- 0 : absence de porteuse,
- 1 : présence de porteuse.

Le signal est ensuite déphasé de  $\pi/2$  pour moduler la seconde partie du flux  $d_2$ . Les deux flux  $d_1$  modulé et  $d_2$  modulé sont additionnés pour donner le signal résultant de la forme :

$$s(t) = d_1(t)\cos 2\pi Ft = d_2(t)\sin 2\pi Ft$$

Avec une modulation d'amplitude à deux états comme décrit ci-dessus, chaque flux peut se trouver dans l'un des états 1 ou 0, et le flux résultant peut donc prendre 4 états 00, 01, 10 et 11. C'est la modulation **QAM 4** qui véhicule des symboles de longueur 2 bits.

Appliquons au même processus une modulation d'amplitude à  $2 \times 2 = 4$  états :

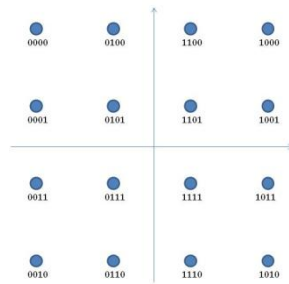
- 00 : absence de porteuse,
- 11 : présence de porteuse,
- 01 : 1/3 de la porteuse,
- 10 : 2/3 de la porteuse.

La résultante prend alors  $4 \times 4 = 16$  états. C'est la modulation **QAM 16** qui véhicule des symboles de longueur 4 bits.

On peut continuer ainsi avec **QAM 64** et **QAM 256**. au-delà, ce n'est plus très réaliste.

On représente les modulations QAM par une constellation de points.

Il y a dans cette modulation une composante d'amplitude et il faudra impérativement utiliser des amplificateurs linéaires de bonne qualité, donc chers.



Modulation QAM 16

### 3.4. LA CHAÎNE DE TRANSMISSION

Reprenons le problème à son début.

Quelqu'un parle dans un micro. Le signal est numérisé, par échantillonnage, ou plus généralement par un vocodeur.

La trame issue du vocodeur est codée puis entrelacée.

Après l'entrelacement, on peut appliquer une opération de **scrambling**, destinée à « marquer » un réseau radio. Nous en parlerons plus tard.

La trame ainsi modifiée est associée avec d'autres pour être modulée. On obtient alors un signal analogique qui est amplifié puis conduit à l'antenne.

En réception, le signal reçu est amplifié, démodulé pour retrouver la trame numérique d'origine.

On fait à l'envers toutes les opérations décrites ci-dessus (scrambling, entrelacement, codage) en appliquant les corrections nécessaires à la récupération des erreurs de transmission.

On retrouve alors une trame qui ressemble à celle sortie du vocodeur, qu'on repasse à l'envers dans un vocodeur pour reconstituer le signal analogique qui représente la parole et l'envoyer dans un haut-parleur.

---

## 4. LES CANAUX RADIO

---

### 4.1. ORGANISATION DU CANAL RADIO

En bande de base, c'est facile. La transmission, par exemple pour de la parole, va utiliser les fréquences 20 à 22000 Hz, limites de la perception de l'oreille, voire moins, par exemple 300-3300 Hz en qualité téléphonique.

Le signal modulé va occuper une plage de fréquences égale à deux fois la fréquence maximum du signal à transmettre. On va le loger dans une étroite partie du spectre radio, centrée sur la fréquence de la porteuse qu'on appelle **canal radio**, identifié par la fréquence de la porteuse.

Ainsi, on va pouvoir découper le spectre radio en rondelles pour affecter des canaux radio différents à des transmissions différentes.

### 4.2. ATTRIBUTION DES CANAUX

L'utilisation d'un canal radio ne se fait pas au petit bonheur la chance. Elle doit suivre des règles nationales et internationales afin que la cohabitation de diverses sources de communications radio puisse se faire harmonieusement. En France, c'est l'**ANFR** qui est responsable du découpage du spectre radio et de l'allocation des fréquences à divers utilisateurs. Le petit tableau (très simplifié) de l'annexe § 6 donne une première idée de l'attribution des fréquences.

Selon sa nature, l'utilisateur doit se positionner dans la plage de fréquences qui lui est impartie et utiliser des canaux radio d'une largeur précise.

Ce n'est pas tout.

Certaines bandes de fréquence sont d'usage libre et l'utilisateur peut émettre sans avoir de compte à rendre à personne, pourvu qu'il respecte certaines règles, notamment en matière de puissance.

D'autres bandes sont **sous licence** et pour émettre, l'utilisateur doit demander une autorisation et verser une redevance à un organisme nommé l'**ARCEP**. L'ARCEP est en outre chargé de fixer les règles d'émission dans les fréquences libres et celles sous licence.

### 4.3. NOTION DE CANAL DUPLEX

Une transmission radio utilise deux voies :

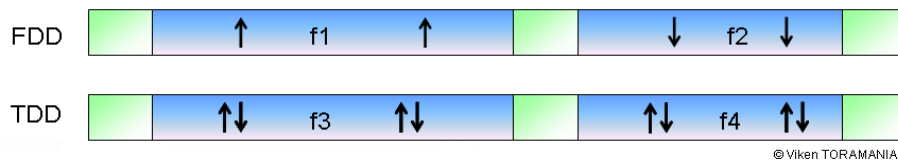
- le **sens montant** pour transporter l'information du terminal vers le relais,
- le **sens descendant** pour transporter l'information du relais vers le terminal.

Une petite astuce pour ne pas les confondre : le relais est installé en hauteur, le terminal est en bas, donc on « monte » du terminal vers le relais – et on descend du relais vers le terminal.

Une communication doit utiliser deux voies pour fonctionner : une dans le sens montant, une dans le sens descendant, c'est ce qu'on appelle un **canal duplex**.

Il existe deux façons de définir un canal duplex :

- Affecter deux canaux radio séparés par un écart dit **écart duplex**. Ce mode, qui utilise donc deux canaux centrés sur deux fréquences différentes, s'appelle **FDD** (Frequency Division Duplex).
- Utiliser un canal unique utilisé alternativement dans le sens montant et dans le sens descendant. Ce mode s'appelle **TDD** (Time Division Duplex).



### 4.4. MULTIPLEXAGE DES TRANSACTIONS RADIO

#### 4.4.1. LES TECHNIQUES DE BASE

La ressource radio est rare et chère. Le nombre de canaux radio est forcément limité, face à un nombre d'utilisateurs toujours croissant. Il va falloir ruser pour optimiser l'utilisation des bandes de fréquence radio.

L'idée est d'utiliser une même bande de fréquences pour faire passer simultanément plusieurs utilisateurs. Nous allons voir différentes techniques de multiplexage qui sont le FDMA, le TDMA et le CSMA.

Pour illustrer ceci, nous allons vous raconter une petite histoire... Il y a une réception à l'Ambassade et de nombreux invités parlant des langues différentes se trouvent dans la salle. Comment faire pour que les personnes parlant la même langue puissent s'entendre sans être gênés par les autres ?

La première façon est de répartir dans chaque coin de la pièce les gens qui parlent la même langue. C'est ce que nous allons appeler FDMA.

La seconde façon consiste à laisser parler tour à tour les gens de chacune des langues. Nous allons appeler ceci TDMA.

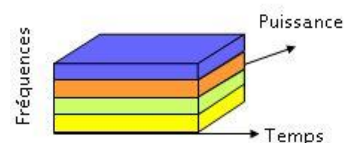
Une troisième façon consiste à laisser tout le monde se mélanger et à faire confiance à l'acuité de l'oreille humaine pour isoler la langue parlée par l'individu. Et bien sûr, c'est du CSMA.

Revenons à la radio !

- **FDMA (Frequency Division Multiple Access)**

Le FDMA est la forme la plus simple de partage d'une bande de fréquences radio, très économique en termes de mise en œuvre. Il consiste à découper la bande de fréquence en plusieurs canaux centrés sur une fréquence. Une transaction utilise un canal et le garde jusqu'à ce qu'elle soit terminée.

Ceci permet autant de transactions simultanées qu'il a été défini de canaux radio.



- **TDMA (Time Division Multiple Access)**

Contrairement au FDMA, la bande radio allouée constitue un canal unique alloué tour à tour aux différents utilisateurs. La transmission d'un utilisateur se fait donc par **burst** pendant le temps d'allocation du canal. Ensuite, la transmission stoppe, le temps de laisser le canal aux autres utilisateurs. Une transaction est donc décomposée en une série de bursts entre lesquels d'autres transactions prennent place sur le canal radio.

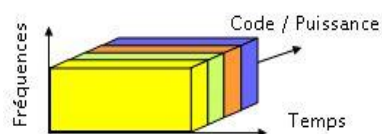
On définit, selon les technologies radio, 2 à 8 tranches de temps sur le canal radio.

FDMA et TDMA sont souvent associés, la bande de fréquence étant découpée en canaux FDMA qui supportent eux-mêmes des sous-canaux TDMA.



- **Le CDMA (Code Division Multiple Access)**

En CDMA, le canal utilise toute la largeur de bande, comme en TDMA et la transmission se fait en continu comme en FDMA. Comment alors faire passer plusieurs communications sur le même canal sans que tout se mélange, demanderez-vous ? Eh bien, le CDMA consiste à « étaler le spectre » en combinant chaque communication avec un code qui lui est alloué en propre. Le terminal récepteur, qui possède le même code, retrouve sa communication en reconnaissant son code parmi les autres.



**Attention** à ne pas confondre les modes FDMA et TDMA avec le partage duplex FDD/TDD décrit plus haut. Mais les deux se combinent. Ainsi un canal duplex peut être par exemple FDMA/FDD, ou encore CDMA/TDD...

#### 4.4.2. L'OFDM

Le multiplexage par fréquences orthogonales (OFDM pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique d'étalement du spectre utilisée par certaines technologies radio.

L'OFDM alloue la totalité du canal à un utilisateur à la fois. Pour permettre l'accès à plusieurs utilisateurs, l'OFDM il doit être combiné à une technique de TDMA ou FDMA.

Le principe de l'OFDM repose sur la répartition du flux à transmettre en plusieurs sous flux qui sont véhiculés sur des sous porteuses adjacentes de même largeur et modulées indépendamment les unes des autres.

L'un des avantages de l'OFDM est que la perte d'une ou plusieurs sous porteuses n'affecte pas le signal entier, mais seulement la partie qui a été codée sur ces sous porteuses. La plupart du temps les codes de correction permettent de reconstituer la partie perdue. Ceci confère aux technologies radio utilisant l'OFDM (Wi-Fi, WiMAX) une meilleure résistance vis-à-vis des perturbations radio et une plus grande distance de propagation.

Le professeur ATENA reviendra plus longuement sur l'OFDM dans un autre fascicule traitant de ces technologies.

---

## 5. LE RÉSEAU RADIO

---

### 5.1. RELAIS ET TERMINAUX

Dans un réseau radio, on installe des émetteurs-récepteurs puissants placés sur des points hauts qu'on appelle **relais**.

Ces relais définissent une zone couverte par le rayonnement électromagnétique de leur antenne, que nous allons appeler **cellule**.

Le réseau radio fournit un service de communication à des utilisateurs équipés de **terminaux** qui fonctionnent à plus faible puissance que le relais et qui sont équipés d'une antenne. Bien sûr, il y en a une dans votre téléphone portable, mais elle est toute petite et bien cachée !

Tout terminal qui se trouve dans une cellule peut capter le signal d'un relais, voire de plusieurs, mais dans ce cas, il sélectionne celui qu'il « entend » le mieux. Il peut alors communiquer, via ce relais, avec d'autres terminaux.

Que se passe-t-il quand deux terminaux qui ne sont pas reliés au même relais veulent communiquer ? Les relais sont tous reliés entre eux par une infrastructure filaire et communiquent entre eux au moyen de celle-ci. Chacun des terminaux communique avec son propre relais, et la continuité de la communication est assurée par les deux relais qui communiquent au moyen de cette infrastructure.

Comme il faut bien coordonner tout ce petit monde et gérer l'établissement des communications, il faut ajouter au réseau un commutateur radio qui joue à peu près le même rôle qu'un central téléphonique, avec en plus des fonctions propres à la radio.

### 5.2. L'INSCRIPTION

Reprenons l'opération décrite ci-dessus : *Tout terminal qui se trouve dans une cellule peut capter le signal d'un relais, voire de plusieurs, mais dans ce cas, il sélectionne celui qu'il « entend » le mieux.*

Un terminal arrive à portée d'un relais. Il va tout d'abord se faire connaître de celui-ci, et via celui-ci, se faire connaître du réseau.

Le terminal « se présente » en donnant son identifiant au relais. Celui-ci le répercute au commutateur radio qui va vérifier l'appartenance à son réseau, vérifier les droits de l'utilisateur (s'il n'est pas interdit de communication, plus prosaïquement s'il a payé sa facture). S'il est d'accord, le commutateur radio renvoie au relais l'autorisation d'accepter le terminal et de l'autoriser à communiquer. Cette opération s'appelle **l'inscription**.

Revenons sur la vérification de l'appartenance au réseau et prenons l'exemple du GSM que nous connaissons bien. Il y a en France quatre opérateurs qui disposent chacun de leur réseau et de leurs propres relais. L'inscription permet bien sûr de filtrer un terminal Orange qui voudrait s'inscrire sur un relais Bouygues, mais vu le nombre de terminaux en circulation, les relais et les commutateurs risqueraient d'être très vite saturés par un grand nombre de demandes d'inscriptions rejetées. C'est pour éviter ceci qu'a été introduit le **scrambling** que nous avons évoqué au § 3.40. Chaque trame est marquée avec un code propre à son réseau, qui la rend incompréhensible par un réseau autre que le sien. Cette fonction évite donc à un relais Bouygues de prendre en compte une demande d'inscription venant d'un réseau Orange.

### 5.3. UTILISATION DES CANAUX RADIO

Chaque relais utilise plusieurs canaux duplex. Une communication utilise un canal radio duplex. A quelques exceptions près, le nombre maximal de communications supportées par un relais est égal au nombre de canaux radio duplex moins un.

Pourquoi « moins un » ?

Pour établir une communication téléphonique, le commutateur radio doit échanger diverses informations avec les usagers (décroché, raccroché, numérotation, etc.) ainsi qu'avec les relais (attribution d'un canal radio, etc.). Cet échange d'information, qu'on appelle **signalisation**, se déroule sur un canal radio particulier, qu'on appelle la **voie balise**.

Un terminal ne reste pas comme ça dans le vide, il doit toujours être relié au relais sur un canal radio. Le terminal qui n'a rien à faire, en d'autres termes qui n'est pas engagé dans une communication, est sur la voie balise.

Le terminal qui désire établir une communication va émettre sa requête en envoyant une signalisation sur la voie balise. Inversement, le terminal qui reçoit une communication est averti de la présentation de celle-ci sur la voie balise.

En téléphonie, lorsque le demandé a décroché, la communication s'établit en phonie de bout en bout. C'est pareil en radio, sauf que ceci ne peut pas se passer sur la voie balise. Chacun des deux terminaux engagés dans la communication basculent sur un autre canal du relais, qu'on appelle **voie de trafic**.

Si les deux terminaux sont inscrits sur le même relais, ils vont utiliser tous les deux la même voie de trafic. S'ils sont inscrits sur deux relais différents, ils utilisent chacun une voie de trafic sur leur propre relais.

En fin de communication les deux retournent sur la voie balise.

Ainsi, un relais va supporter une voie balise + plusieurs (au moins une) voies de trafic.

Toute règle ayant bien sûr ses exceptions, il existe des systèmes radio qui fonctionnent sans voie balise, mais restons sur le cas général.

### 5.4. LE MODÈLE CELLULAIRE

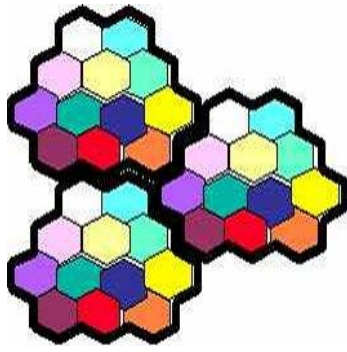
Un relais qui diffuse sur plusieurs canaux doit être seul à les utiliser, sinon il y a des interférences entre les émetteurs iso-fréquences. Mais cette restriction ne vaut que dans la zone couverte par cet émetteur (la cellule), d'où l'idée de réutiliser plus loin cette même fréquence. Ainsi est né le modèle cellulaire.

Il ne faut pas croire que le canal va être réutilisable dès qu'on est sorti des limites de la cellule. Le signal radio s'atténue progressivement et on définit la cellule à la zone sur laquelle l'émission reste au-dessus d'un seuil donné. Au-delà des limites de la cellule, il reste encore un peu de signal, suffisant pour provoquer des interférences. Aussi on doit respecter une distance de quelques cellules entre deux relais iso-fréquences. Ceci définit un motif que l'on représente traditionnellement en nid d'abeille.

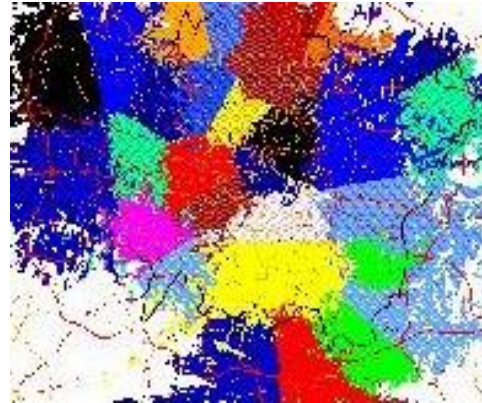
De même, l'émission, centrée sur la fréquence du canal, ne s'arrête pas brutalement aux limites de celui-ci. Par exemple, si un canal radio de 10 kHz est centré sur la fréquence 115 MHz, la largeur du canal est définie entre 110 et 120 MHz, mais un peu du signal déborde au-dessous de 110 MHz et au-dessus de 120 MHz, pouvant ainsi créer des interférences sur une cellule adjacente qui utiliserait une fréquence consécutive, par exemple 120-130 MHz.

L'allocation des canaux doit donc satisfaire deux impératifs :

- garder une distance suffisante entre deux relais utilisant un même canal,
- garder une distance suffisante entre deux relais utilisant des canaux adjacents.



*Motif 12 cellules et couverture cellulaire d'une zone*



Le modèle cellulaire permet de faire un réseau radio avec beaucoup de relais, tout en minimisant le nombre de canaux nécessaires.

Il a également un autre avantage qui est celui de densifier le trafic. En diminuant la taille des cellules, la capacité de trafic de chacune étant juste fonction du nombre de voies de trafic de son relais, on augmente globalement la capacité de trafic d'une région donnée en multipliant le nombre de cellules nécessaires à sa couverture.

---

## **6. A SUIVRE...**

---

D'autres livres blancs du professeur ATENA vous permettront d'aborder les principales techniques radio et leur utilisation.

## 7. ANNEXE : TABLEAU DES FRÉQUENCES

Ceci est une version très simplifiée du Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences (TNRBF qui peut être consulté sur le site de l'ANFR :

[http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/Tableau\\_Derive\\_Mars2012.pdf](http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/Tableau_Derive_Mars2012.pdf)

|         |                                      |   |
|---------|--------------------------------------|---|
| 300 GHz | <b>EHF</b><br>(Extra High Frequency) | <i>Réseaux privés</i>   |
| 30 GHz  |                                      | <i>Liaisons vidéo portable</i><br><i>Dispositifs anticollision des véhicules</i>                        |
| 3 GHz   | <b>SHF</b><br>(Supra High Frequency) | <i>BLR – WiMAX – Liaisons satellites</i>  |
| 300 MHz |                                      | <i>Réseaux privés</i><br><i>Détecteurs de mouvement et d'alerte – Vidéo portable</i>                    |
| 30 MHz  | <b>UHF</b><br>(Ultra High Frequency) | <i>TV analogique et numérique – Balises ARGOS</i>   |
| 3 MHz   |                                      | <i>Réseaux privés – RLAN (Wi-Fi) – GSM – Réseaux 3G/ 4G</i><br><i>Téléphones numériques DECT - GPS</i>  |
| 300 kHz | <b>VHF</b><br>(Very High Frequency)  | <i>Radiodiffusion FM – TV analogique et numérique</i>   |
| 30 kHz  |                                      | <i>Réseaux privés – Trafic maritime et fluvial</i><br><i>Radiomessagerie – Aéronautique - Militaire</i> |
| 3 MHz   | <b>HF</b><br>(High Frequency)        | <i>Radiodiffusion OC</i>  |
| 300 kHz |                                      | <i>Téléphones sans fil analogiques CT0</i><br><i>Radioamateurs</i>                                      |
| 30 kHz  | <b>MF</b><br>(Medium Frequency)      | <i>Radiodiffusion PO</i>  |
| 3 kHz   | <b>LF</b><br>(Low Frequency)         | <i>Radiodiffusion GO</i>  |
| 300 Hz  |                                      | <i>Communications avec les sous marins</i><br><i>Sonars</i>   |
|         | <b>ELF</b><br>(Extra Low Frequency)  | <i>Communications avec les sous marins</i>  |

## 8. GLOSSAIRE

La plupart des définitions qui suivent sont extraites du *Lexique des TIC* de Forum Atena <Réf. 1>.

|             |  |
|-------------|--|
| ANFR        | <i>Agence Nationale des Fréquences</i> – Un organisme français chargé de l'allocation des fréquences radio à ses différents utilisateurs.  |
| ARCEP       | <i>Autorité de Régulation des Communications Électroniques et de la Poste</i> – Un organisme français chargé de la régulation des communications, et entre autres de l'attribution des licences radio. |
| CDMA        | <i>Code Division Multiplexing Access</i> – Une technique de multiplexage qui consiste à transmettre différentes communications sur un canal unique en les différenciant par leur codage                |
| Cellule     | La zone couverte par le rayonnement électromagnétique d'un relais.   |
| Codage      | Une fonction qui consiste à transformer un signal en vue de sa transmission sur un support numérique.  |
| Commutateur | Un ensemble d'organes qui établit des connexions temporaires (commutation) entre des utilisateurs au travers d'un réseau.  |

|                   |   |
|-------------------|---|
| FDD               | <i>Frequency Division Duplex</i> – Un mode d'organisation de canaux duplex qui occupent deux bandes de fréquence respectivement allouées aux canaux descendants et montants. Un canal montant et son homologue descendant sont espacés d'un écart duplex fixe $\Delta f$ dont la valeur dépend de la fréquence moyenne de la bande de fréquences. |
| FDMA              | <i>Frequency Division Multiple Access</i> – Une technique de multiplexage qui permet de transporter différentes communications sur autant de sous-canaux d'un même canal radio.   |
| GSMK              | <i>Gaussian Minimum-Shift Keying</i> – Une modulation dérivée de PSK qui agit sur la phase de la porteuse.  |
| Hz                | <i>Herz</i> – Une unité de fréquence d'un signal alternatif qui correspond à une alternance par seconde. En abrégé Hz.  |
| PSK               | <i>Phase Shift Keying</i> – Une famille de modulation qui agissent sur la phase de la porteuse.   |
| PSK               | <i>Phase-Shift Keying</i> – Une famille de modulations qui agissent sur la phase de la porteuse.  |
| QAM               | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> – Une famille de modulations qui agissent sur la phase et l'amplitude de la porteuse.  |
| QAM               | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i> – Une famille de modulations qui agissent sur la phase et l'amplitude de la porteuse.  |
| Réseau Cellulaire | Un réseau radio dont l'infrastructure est composée de relais et d'organes de commutation interconnectés au moyen d'un cœur de réseau filaire. Chaque relais définit une cellule du réseau. Ce modèle permet une optimisation du spectre radio et une augmentation de la capacité de trafic lorsqu'on diminue la taille des cellules.              |
| TDD               | <i>Time Division Duplex</i> – Un mode d'organisation de canaux duplex qui occupent une bande de fréquence dans laquelle un même canal est alternativement montant et descendant.  |
| TDMA              | <i>Time Division Multiple Access</i> – Une technique de multiplexage qui permet de transporter différentes communications sur autant d'intervalles de temps d'un canal radio.   |

---

## 9. BIBLIOGRAPHIE

---

- <Réf. 1> Lexique des TIC Edition Forum ATENA  
 <Réf. 2> Petite histoire de la radio par Michèle Germain *Livres blancs Forum ATENA*

---

## 10. A PROPOS DE L'AUTEUR

---

**Michèle Germain** est ingénieur de l'Institut Supérieur d'Électronique de Paris.

Pour Matra Communication et EADS elle a participé à de grands projets de téléphonie et de radiocommunications (Matracom 6500, Radiocom 2000, réseaux PMR...).

Elle anime l'atelier d'écriture de Forum ATENA et elle a participé comme co-auteur et coordinatrice à la production de plusieurs des ouvrages de la Collection ATENA.

A l'ISEP, elle a enseigné les techniques de radiocommunications professionnelles PMR.

Elle est auteur des livres « Informatique et numérique à l'usage des Seniors » et « Du téléphone au smartphone » (Éditions du puits fleuri).



---

Les idées émises dans ce livre blanc n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et pas celle de Forum ATENA.  
La reproduction et/ou la représentation sur tous supports de cet ouvrage, intégralement ou partiellement, est autorisée à la condition d'en citer la source comme suit :

© **Forum ATENA 2012 – Introduction aux réseaux**

**Licence Creative Commons**

- Paternité
- Pas d'utilisation commerciale
- Pas de modifications



L'utilisation à but lucratif ou commercial, la traduction et l'adaptation sur quelque support que ce soit sont interdites sans la permission écrite de Forum ATENA.