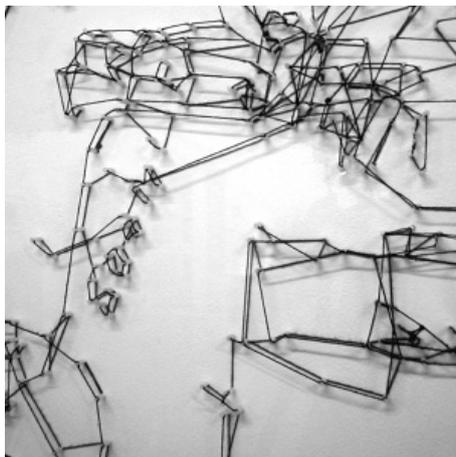


Rapport TrEx SUPAERO : Emission et Réception hautes fréquences

Dimitri Sluys - Emmanuel Branlard

Décembre 2006



(Claire Maugeais - 2006)

Table des matières

1	Vers la transmission de l'information sans fil	6
1.1	L'électromagnétisme support de l'information	6
1.2	Bref historique	6
1.3	Les liaisons sans fil	7
1.3.1	Intérêts de l'immatérialité de l'onde	7
1.3.2	Inconvénients de l'utilisation d'un espace public	7
1.4	Moyens de transmission de l'onde	7
1.5	Matériel utilisé pour les expériences	8
1.5.1	Le générateur de signaux	8
1.5.2	L'analyseur de spectre	8
1.5.3	L'oscilloscope	8
1.6	Multiplexage	9
1.6.1	Définitions	9
1.6.2	Le multiplexage temporel	9
1.6.3	Le multiplexage fréquentiel	9
1.6.4	Le multiplexage codal	10
1.6.5	Le multiplexage géographique	10
2	Limite de la transmission de l'information, le bruit	11
2.1	Définition du bruit	11
2.2	Les différents types de bruits	11
2.2.1	Les bruits thermiques	11
2.2.2	Autres types de bruit	13
2.3	Transmission du bruit dans les réseaux linéaires	13
2.4	Définition du facteur de bruit	14
2.4.1	Cas d'un seul quadripôle	14
2.4.2	Cas des quadripôles en cascade et théorème de Friis	14
2.5	Modélisation du bruit dans une liaison satellite	15
3	Méthode de transmission de l'information, la modulation	16
3.1	Introduction	16
3.2	La modulation d'amplitude à porteuse supprimée	16
3.2.1	Principe de la modulation	16
3.2.2	Principe de la démodulation	18
3.3	La modulation d'amplitude à porteuse conservée	20
3.3.1	Principe de la modulation	20
3.3.2	La démodulation	22
3.4	La modulation angulaire	23
3.4.1	La modulation en phase	23
3.4.2	La modulation en fréquence	25
3.4.3	Comparaison des méthodes angulaires	26

4 Applications actuelles de ces techniques de transmission	27
4.1 Différence Analogique-Numérique	27
4.1.1 Numérique	27
4.1.2 Analogique	27
4.2 Technique de modulation moderne	28
4.3 La modulation de la radio	30
4.4 Les normes actuelles de transmissions	30
A Schéma d'une chaine d'emission réception	32
B Conclusion	33
C Bibliographie	34

Table des figures

1	Représentation 3D des champs électromagnétiques	6
2	Analyseur de spectre utilisé pour les expériences	8
3	Oscilloscope utilisé pour les expériences	9
4	Superposition de bruit à un signal	11
5	Fonction densité spectrale de bruit au premier ordre	12
6	Scéma simplifié d'une liaison satellite	15
7	Principe de la modulation d'amplitude	17
8	Spectre d'émission - modulation d'amplitude à porteuse supprimée	17
9	Spectre d'émission continu - modulation d'amplitude à porteuse supprimée	17
10	Représentation du signal émis, porteuse supprimée	18
11	Signal obtenu après démodulation	18
12	Spectre d'émission - modulation d'amplitude à porteuse atténuée	19
13	Diagramme de fresnel représentant la tension d'entrée reçue de fréquence F_e en fonction de la porteuse générée à la réception par la PLL de fréquence F_s . A droite : cas de la porteuse supprimée. A gauche : cas de la porteuse atténuée	20
14	Schéma d'une PLL (Phase Lock Loop)	20
15	Spectre d'émission continu - modulation d'amplitude à porteuse conservée	21
16	Spectre d'émission - porteuse conservée	21
17	Signal émis - porteuse conservée	21
18	Schéma d'un détecteur d'enveloppe	22
19	Montage d'un détecteur d'enveloppe	22
20	Fonctions de Bessel de première espèce	23
21	Spectre d'émission - modulation de phase	24
22	Observation d'un saut de phase de π - modulation de phase	24
23	Diagramme de Bode - modulation de phase	25
24	Principe analogique de la modulation de phase	25
25	Observation d'une modulation de fréquence	25
26	Spectre - modulation de fréquence	26
27	Cas de deux états de phase - saut de phase de π	28
28	Cas de 4 états de phase - saut de phase de $\pi/2$	28
29	Cas de 8 états de phase saut de $\pi/4$ - modulation de phase	29
30	Analyseur de spectre vectoriel - modulation de phase sans filtre - 4 états	29
31	Analyseur de spectre vectoriel - modulation de phase avec filtre - 4 états	29
32	Représentation spectrale d'un signal radio	30

INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'année, le secteur des télécommunications sans fils s'est extrêmement développé, faisant naître de nouvelles technologies telle le WiFi, le Bluetooth. En effet, le manque de mobilité due à l'utilisation de fils réduisait les possibilités de communication. De plus les fils génèrent un encombrement certain, qu'il est souhaitable d'éviter. Mais malgré des avantages apparents, un nouvel encombrement apparait par le fait que toutes les communications ont lieu dans un même support physique : l'air. De surcroît, nous verrons que pour recevoir une information, il convient de recevoir un signal le moins bruité possible. C'est pourquoi de nouvelles méthodes de codage et transmission de l'information doivent être mise en place, afin de permettre à cette nouvelle technologie sans fil de se développer peut-être jusqu'à devenir le principal moyen d'échange d'informations aux dépens des liaisons filaires.

1 Vers la transmission de l'information sans fil

1.1 L'électromagnétisme support de l'information

Toute onde possède un caractère électrique et un caractère magnétique, ces deux perturbations s'additionnent et ont lieu dans des plans perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. On peut la définir par sa longueur d'onde λ , sa fréquence f , ou sa pulsation ω ; les trois paramètres étant toujours reliés par $\lambda f = c$ et $\omega = 2\pi f$ où c est la célérité du son dans le vide. L'idée d'utiliser les ondes vient du fait que le produit onde-fréquence est constant.

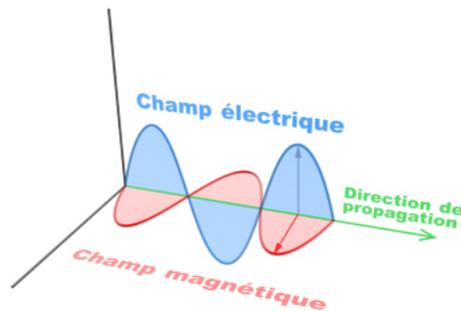


FIG. 1 – Représentation 3D des champs électromagnétiques

1.2 Bref historique

1837 : codage des lettres de l'alphabet par S.Morse, système utilisé dans le télégraphe, qui devient électrique en 1839.

1870 : liaison télégraphique aérienne et sous-marine entre Londres et Calcutta (environ 10000 km).

1876 : G. Bell utilise la ligne électrique pour transmettre les signaux vocaux : c'est la naissance du téléphone.

1896,1899,1901 : Télégraphie sans fil par G. Marconi sur des distances de plus en plus grande.

1907 : transmission d'image par E. Belin

1914-1918 : théorie de l'information par L. Brillouin.

1923 : émission radiophonique, modulations d'amplitude et de phase (réalisé en 1936 par E. Armstrong).

1938 : codage numérique par A. Reeves.

1962 : première liaison transatlantique de la télévision, assurée par satellite (Teslar I).

Aujourd'hui : sondes spatiales, satellites géostationnaires, téléphonie mobile, internet sans fil traduisent l'extension des échelles pour les télécommunications.

1.3 Les liaisons sans fil

On n'utilise plus ici des câbles coaxiaux, des fibres optiques ou des fils pour véhiculer l'information mais les ondes.

1.3.1 Intérêts de l'immatérialité de l'onde

Bien évidemment, l'intérêt majeur d'une liaison sans fil est l'absence de moyen physique de transport de l'information, et donc un gain en encombrement. L'atout se situe donc au niveau de la mobilité et des infrastructures. En effet, on travaille aujourd'hui pour fournir internet partout : lieux publics, train, et même dans l'avion. Il n'est plus nécessaire d'enmurer des fils chez soi, on gagne donc économiquement au niveau du matériel périphérique à utiliser. En terme de "puissance" de l'information, il y a moins de perte sur les longues distance qu'avec des fils, on peut envoyer plus d'information. C'est de ce principe que sont nées la télévision par satellite, numérique, et haute définition, qui nécessite de plus en plus grands débits d'information.

1.3.2 Inconvénients de l'utilisation d'un espace public

Le premier inconvénient est que puisque l'information "traverse" l'air, on peut (modulo certaines méthodes) récupérer des informations qui ne nous sont pas adressées, volontairement ou involontairement, obtenir des information croisées avec d'autres (ou subir un déphasement des paquets d'ondes à cause de réverbérations) . On en vient alors à coder l'information, à utiliser différents canaux de transmission. Tout ceci donne naissance au multiplexage.

Le deuxième est que comme le produit fréquence-longueur d'onde est constant, il est impossible de transmettre directement une onde hertzienne car les longueurs d'onde des ondes basse fréquence (BF, $f < 300kHz$, le son par exemple) seraient énormes et il faudrait donc des capteurs du même ordre de grandeur. D'une part difficile à réaliser et d'autre part encombrant, on préfère utiliser les techniques de modulation pour transmettre l'information sous forme de haute fréquence (HF, $f > 3MHz$, télévision par exemple).

Exemple : pour le son moyen 10kHz par exemple, il faudrait une antenne de l'ordre de 15km ...

1.4 Moyens de transmission de l'onde

- *propagation directe* : émetteur et récepteur sont en vue "optique", donc cette méthode est à mettre en oeuvre pour les faibles distances.
- *diffraction* : modification de l'intensité selon la direction de propagation après rencontre d'un obstacle. Les ondes radio ont une longueur

d'onde grande donc la diffraction est facile et donc on peut desservir des zones qui seraient inaccessibles autrement.

- *réflexion par l'ionosphère* : l'ionisation des particules s'effectue en haute altitude par l'émission d'électrons qui réfléchissent l'onde. Ces réflexions s'additionnent à celles sur le sol et c'est le deuxième moyen (avec la diffraction) d'atteindre des zones inaccessibles au départ.

1.5 Matériel utilisé pour les expériences

1.5.1 Le générateur de signaux

Cet instrument fournit des signaux électriques aux caractéristiques entièrement paramétrables (fréquences, amplitude, formes...). Nous avons utilisé pour nos expériences des générateurs de marque Agilent. Leur utilisation s'est avérée très pratique car ces générateurs possèdent des fonctions de modulation intégrées : modulation d'amplitude, de fréquence et de phase.

1.5.2 L'analyseur de spectre

L'analyseur de spectre mesure la puissance électrique du signal qu'il reçoit en fonction de la fréquence. Cet instrument est donc sensible à l'amplitude du signal envoyé car la puissance est fonction croissante de celle-ci. Nous avons vu qu'il fallait travailler avec des instruments en impédance adaptée. L'impédance équivalente d'entrée de l'analyseur de spectre est de 50 Ohms.



FIG. 2 – Analyseur de spectre utilisé pour les expériences

1.5.3 L'oscilloscope

Un oscilloscope est un appareil de mesure destiné à visualiser graphiquement un signal électrique. Un canon à électrons situé à l'intérieur de l'appareil, émet un faisceau qui est dévié en passant entre deux plaques métalliques soumises à la tension d'entrée. Le même phénomène est utilisé pour décomposer le signal en fonction du temps. Afin que l'utilisateur puisse voir la tension,

les électrons vont percuter l'écran fluorescent de l'oscilloscope en produisant une lumière.

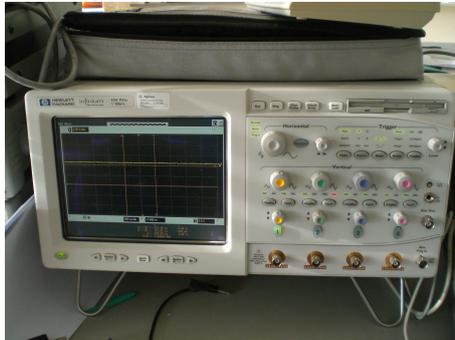


FIG. 3 – Oscilloscope utilisé pour les expériences

1.6 Multiplexage

1.6.1 Définitions

Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations basse vitesse à travers un seul support de transmission (support physique appelé voie à haute vitesse). Le signal des émetteurs est combiné à l'aide d'un multiplexeur avant d'être transmis à travers la voie haute vitesse. Après ce transit, les informations sont recueillies à l'aide d'un demultiplexeur. Nous allons présenter les différents types de multiplexage dans ce qui suit.

1.6.2 Le multiplexage temporel

Dans le cas du multiplexage temporel (Time Division Multiplexing Access : TDMA), le multiplexeur fonctionne comme un commutateur, les signaux sont transmis successivement après avoir été échantillonnés, une synchronisation de fréquence et de phase étant assurée de part et d'autre pour que chaque signal soit restauré où et comme il le faut. Avec cette technique la totalité de la bande passante est allouée pour chaque signal. Le multiplexage temporel a commencé par être utilisé dans les avions, pour que chaque passager puisse commander sa propre lampe sans qu'on relie chaque interrupteur de chaque passager à chaque commutateur de lampe. C'est ce multiplexage qui introduit souvent un petit délai entre le moment où on presse l'interrupteur et celui où la lampe s'allume.

1.6.3 Le multiplexage fréquentiel

Le multiplexage fréquentiel (Frequency Division Multiplexing Access : FDMA) consiste à allouer à chaque signal d'entrée un canal ayant une bande de fréquence (bande passante) donnée. Ainsi la bande de fréquence du signal

est séparée en autant de canaux que de signaux d'entrés, et toutes les informations circulent en même temps sur la voie haute vitesse.

1.6.4 Le multiplexage codal

Le multiplexage codal (Code Division Multiplexing Access : CDMA) consiste à rajouter une donnée au signal. Ainsi, seuls les récepteurs à qui ce signal est destiné pourront décoder et reconstituer le signal. Cette méthode est utilisé par les GPS pour différencier les voitures. La technologie 3G développée pour les portables utilise également cette méthode(Wide CDMA).

Pour la téléphonie mobile, on utilise trois types de multiplexage : le multiplexage fréquentiel (FDMA), le multiplexage temporel (TDMA) et le multiplexage par code (CDMA). Le multiplexage fréquentiel, était déjà utilisé en téléphonie analogique. La norme GSM utilise le multiplexage fréquentiel et temporel.

1.6.5 Le multiplexage géographique

Le multiplexage géographique consiste à envoyer les différents signaux sur des zones géographiques différentes. Ainsi pour une même fréquence, en France, suivant la zone géographique, on ne reçoit pas la même station radio. Si les zones géographiques sont suffisamment éloignées, les signaux ayant la même fréquence ne se perturberont pas.

2 Limite de la transmission de l'information, le bruit

2.1 Définition du bruit

Si les transmissions ne sont pas dans la réalité parfaites, c'est à cause d'un phénomène appelé le bruit. Le bruit comprend tout signal étranger au signal qu'on souhaite transmettre. Le bruit est donc un phénomène électromagnétique. Le signal reçu est la superposition des deux signaux (original et bruit). En effet que ce soit dans des liaisons optique, radioélectrique etc... le bruit limite donc la qualité de la liaison, la distance maximale atteignable et le débit maximal d'information.

Par exemple :

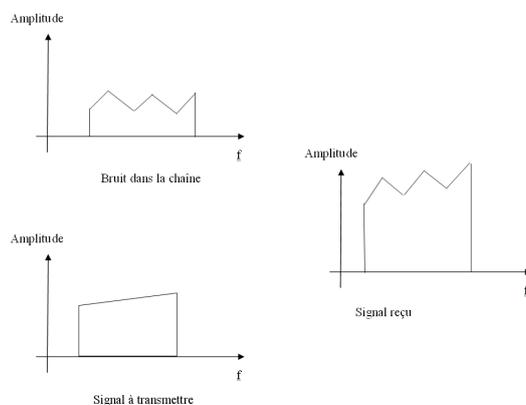


FIG. 4 – Superposition de bruit à un signal

Bien sûr, plus une chaîne est de bonne qualité, moins il y a de bruit et inversement.

2.2 Les différents types de bruits

Le bruit est donc indépendant du signal à transmettre mais fausse parfois complètement le signal reçu. Pour les bruits liés aux systèmes électroniques, on distingue différents types de bruit :

2.2.1 Les bruits thermiques

Le bruit intérieur aux systèmes électriques Ce bruit a pour origine le mouvement des porteurs de charges, c'est-à-dire leur agitation. Il se manifeste par une tension aléatoire aux bornes de tout élément résistif.

Il se manifeste selon une densité spectrale

$$G_{\nu}(f) = 2k_B T R \frac{\left| \frac{h \cdot f}{k_B T} \right|}{e^{\left| \frac{h \cdot f}{k_B T} \right|} - 1}$$

où :
 f fréquence considérée dans R ,
 k_B constante de Boltzmann,
 h constante de Planck,
 T température,
 R résistance.

Mais cette formule peut être remplacée par son développement au 1er ordre :

$$G_\nu(f) = 2k_B T R$$

valable pour toute fréquence. La valeur de la densité spectrale est la même pour toute fréquence : c'est un *bruit blanc*. La représentation est :

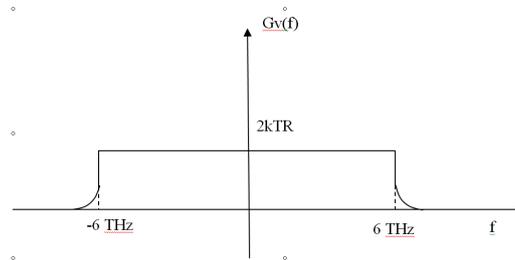


FIG. 5 – Fonction densité spectrale de bruit au premier ordre

Le bruit extérieur aux systèmes électriques On rappelle que tous les corps noirs (ou objets considérés comme tels) rayonne suite à l'agitation thermique selon la loi de Stefan :

$$P_{rayonne} = \epsilon \sigma T^4$$

On remarque la dépendance en à l'ordre 4 en T. Le rayonnement est donc d'autant plus fort que le corps est chaud. C'est ce qui permet par exemple de repérer en astronomie les étoiles lointaines. L'univers lui-même possède donc un bruit de rayonnement cosmique. Pour les systèmes étudiés en laboratoire, ce bruit n'est pas à prendre en considération.

Il faut donc retenir qu'on perçoit du bruit depuis l'extérieur de tout système à partir du moment où il y a des corps à température "élevée".

Application : On peut calculer la puissance du bruit thermique dans une bande de fréquence Δf :

$$P = \int_{-\Delta f - f_0}^{-f_0} G_\nu(f) df + \int_{f_0}^{\Delta f - f_0} G_\nu(f) df = 4k_B T R \Delta f$$

On en déduit la puissance (maximale) disponible de bruit thermique

$$P_u = \frac{P}{4R} = k_B T \Delta f$$

De manière analogue on aurait pu définir le bruit avec une densité spectrale en courant $G_i(f) = 2k_B T g$ où $R.g = 1$.

2.2.2 Autres types de bruit

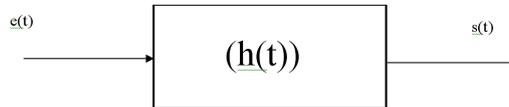
Il existe d'autres bruits non étudiés dans notre TrEx, qui sont négligeables dans plusieurs cas :

Le bruit en grenaille : Il a pour origine la nature corpusculaire des charges dans un courant lorsqu'elles traversent une barrière de potentiel, et est présent principalement dans les diodes.

Le bruit flicker : Il a pour origine une fluctuation rapide de tension, par exemple dans les éoliennes ou les moteurs.

2.3 Transmission du bruit dans les réseaux linéaires

Considérons un système linéaire quelconque :



La réponse de ce système est

$$S(f) = \epsilon(f) \cdot H(f)$$

où S et ϵ représentent les transformées de Fourier et H la fonction de transfert. En reprenant les notations précédentes, on obtient la relation entre les densités spectrales de bruit en entrée et en sortie :

$$G_s(f) = |H(f)|^2 \cdot G_e(f)$$

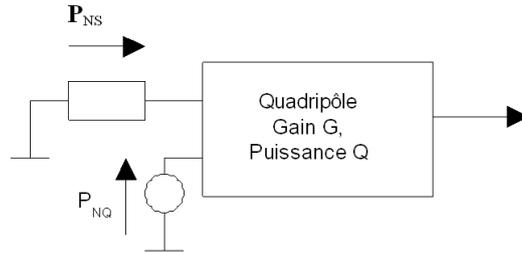
On peut également définir une bande équivalente de bruit du système lorsqu'un tel système est attaqué par un bruit blanc. Elle a pour but de modéliser l'action du bruit de manière discrète et périodique sur les gammes de fréquence.

2.4 Définition du facteur de bruit

Ce facteur représente en fait le rapport SIGNAL à BRUIT, c'est lui qui détermine la qualité d'une liaison.

2.4.1 Cas d'un seul quadripôle

Dans le cas d'un quadripôle Q réel qu'on modélise par un quadripôle idéal (c'est-à-dire en ramenant le bruit à l'entrée), on a



$$F = \frac{\text{Puissance de bruit en sortie}}{\text{Puissance de bruit en sortie si } Q \text{ était idéal}} = \frac{G(P_{NS} + P_{NQ})}{GP_{NS}} = 1 + \frac{P_{NQ}}{P_{NS}}$$

où P_{NS} est lié à l'entrée dans Q et P_{NQ} est le bruit ramené à l'entrée.

On peut aussi définir une autre quantité qui mesure la qualité d'un quadripôle, la température de bruit. De manière plus précise, avec les définitions précédentes et en posant T_0 la température du générateur qui attaque à l'entrée, le puissance s'exprime de la manière suivante :

$$P_{NQ} = k_B T B_n$$

où B_n est la bande équivalente de bruit et T la température de bruit. En augmentant la température de la source de T_e . On obtient dans ce cas $F = 1 + T_e/T_0$.

On peut définir le rapport $\frac{\text{signal}}{\text{bruit}} = \frac{S}{N}$ et le lier à F selon la relation

$$F = \frac{\frac{S}{N_e}}{\frac{S}{N_s}}$$

2.4.2 Cas des quadripôles en cascade et théorème de Friis

Si on considère une chaîne de quadripôles $Q_i, i = 1..n$ qu'on étudie de manière analogue à ce qui précède, on montre en soulignant que le bruit est ramené à l'entrée pour chaque quadripôle, la formule de Friis :

$$F_{1n} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \dots \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_n}$$

2.5 Modélisation du bruit dans une liaison satellite

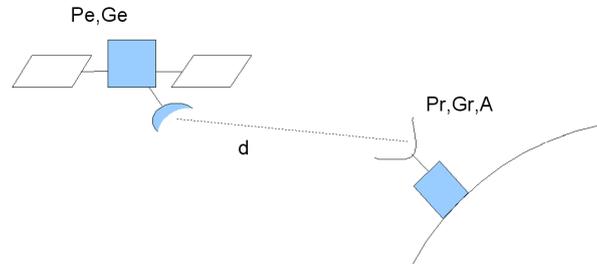


FIG. 6 – Scéma simplifié d'une liaison satellite

Avec les hypothèses, on a la puissance reçue $P = P_e G_e (A/4\pi d^2)$ par une surface d'aire A située à une distance d . Par la méthode des surfaces équivalentes, et en introduisant la température équivalente de bruit T_e ramené à l'antenne, en appelant B la bande passante, le rapport signal sur bruit est :

$$\frac{S}{N} = \frac{P_e G_e G_r}{k_B T_e B} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

De cette formule on déduit deux manières d'optimiser ce rapport :

- Augmentation de la taille de l'antenne
- Diminution du facteur de bruit de la tête de réception

La première méthode est la première à avoir été mise en oeuvre, car la taille, matériau essentiel des récepteurs, n'était pas coûteuse, mais l'orientation précise de l'antenne posait alors problème.

3 Méthode de transmission de l'information, la modulation

3.1 Introduction

Nous avons vu qu'il existait plusieurs méthodes de multiplexage permettant d'émettre plusieurs informations simultanément. Toutefois, compte tenu de l'importance du nombre d'informations à transmettre via le réseau aérien, il convient d'utiliser d'autres méthodes en plus du multiplexage, permettant d'étendre les possibilités d'émissions. Ces différentes méthodes, dites de modulation, vont permettre de jouer sur un des trois paramètres (phase, fréquence ou amplitude) d'un signal porteur à haute fréquence (la porteuse). La porteuse est de la forme :

$$s_0(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

Le signal que l'on veut transmettre, appelé signal modulant, est de la forme

$$x(t) = X \cos(\omega t)$$

Les informations de ce signal sont ainsi injectées dans un des trois paramètres (phase, amplitude, fréquence) pour être ensuite transportées par le signal modulé $s(t)$ en sortie du modulateur.

3.2 La modulation d'amplitude à porteuse supprimée

La modulation d'amplitude à porteuse supprimée est l'une des modulations les plus faciles à mettre en œuvre et à interpréter expérimentalement. Ici le paramètre qui portera les informations du signal sera l'amplitude de la porteuse.

3.2.1 Principe de la modulation

La modulation d'amplitude se fait par simple multiplication du signal de la porteuse par le signal lui-même. En effet, le signal résultant $s(t)$ vaudra :

$$s(t) = s_0(t).x(t) = \frac{X}{2} \cdot [\cos((\omega_0 + \omega)t) + \cos((\omega_0 - \omega)t)]$$

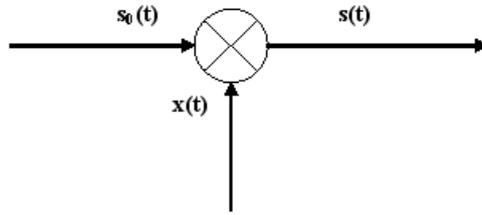


FIG. 7 – Principe de la modulation d'amplitude

On obtient ainsi un spectre du signal émis centré sur la fréquence de la porteuse :

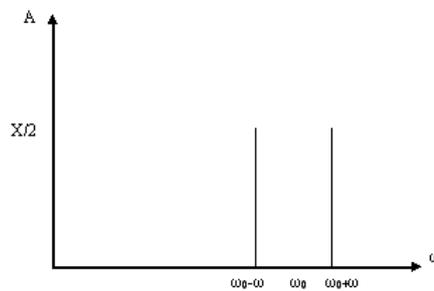


FIG. 8 – Spectre d'émission - modulation d'amplitude à porteuse supprimée

En réalité, le signal que l'on veut transmettre est constitué d'une certaine bande de fréquence, et c'est celle-ci qui est translatée et reproduite de part et d'autre de la fréquence de la porteuse :

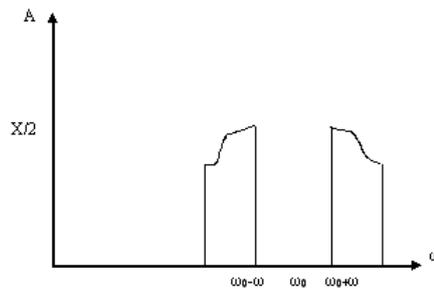


FIG. 9 – Spectre d'émission continu - modulation d'amplitude à porteuse supprimée

L'intérêt de la modulation à porteuse supprimée vis-à-vis de la modulation à porteuse conservée, est une meilleure puissance transmise. La modulation semble facile dans le cas où la fréquence de la porteuse est exactement connue, toutefois nous verrons, dans un second temps, qu'en réalité la démodulation est plus complexe .

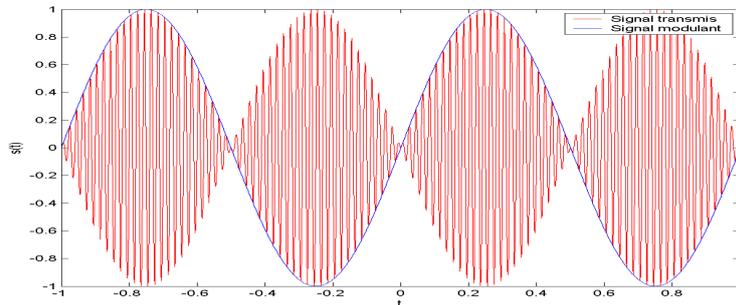


FIG. 10 – Représentation du signal émis, porteuse supprimée

3.2.2 Principe de la démodulation

Démodulation à porteuse supprimée La démodulation (action permettant d'extraire le signal $x(t)$ modulé par la porteuse) se fait en multipliant le signal reçu par la porteuse. Ceci exige que le récepteur ait une connaissance exacte de la fréquence de la porteuse pour pouvoir reproduire celle-ci. Or, en pratique, il sera impossible d'avoir un signal parfaitement synchrone de la porteuse. Ici on supposera donc que le signal reçu $s(t)$ sera multiplié par un signal de pulsation $\omega_0 + \delta\omega_p$. Cette opération produit le signal :

$$\frac{A}{4} (\cos((\omega + 2\omega_0 + \delta\omega_p)t) + \cos(-\omega - \delta\omega_p)t + \cos(\omega - \delta\omega_p)t + \cos(-\omega - 2\omega_0 - \delta\omega_p)t)$$

Après filtrage à travers un filtre passe bas, jouant sur le fait $\omega_0 \gg \omega$, on récupère le signal :

$$\frac{A}{4} (\cos((\omega - \delta\omega_p)t) + \cos((\omega + \delta\omega_p)t))$$

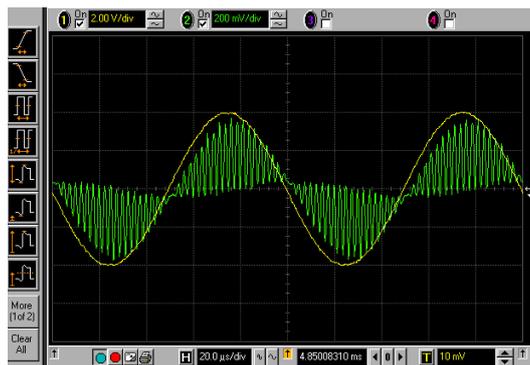


FIG. 11 – Signal obtenu après démodulation
en jaune le signal modulant, en vert le signal après démodulation

- Si $\delta\omega = 0$, c'est-à-dire si on est parvenu à régénérer exactement la porteuse, on observe alors exactement le signal modulant avec une atténuation d'amplitude d'un facteur 2.

- Au contraire, si $\delta\omega \neq 0$, par un changement de repère on passe la pulsation négative en pulsation positive $\omega + \delta\omega_p$. On a un décalage des raies et il se produit un phénomène de battement, qui se traduit par un bruit caractéristique dans un haut parleur.

Dans ce cas, on ne perçoit pas exactement le signal modulant. Il apparaît donc indispensable de régénérer la porteuse au niveau de l'oscillateur local. Pour ce faire on en garde une trace lorsque l'on transmet le signal : c'est la modulation d'amplitude à porteuse conservée. Mais dans notre cas, on ne transmet qu'une porteuse qui est atténuée contrairement à ce qui sera vu dans la section suivante.

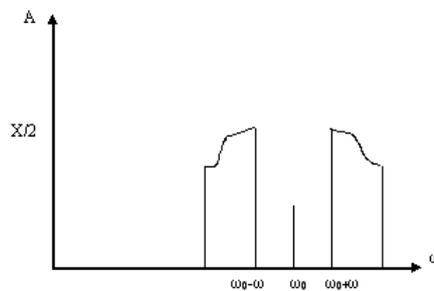


FIG. 12 – Spectre d'émission - modulation d'amplitude à porteuse atténuée

Démodulation à porteuse atténuée Cette fois-ci, la fréquence de la porteuse étant présente dans le signal reçu, on va essayer de la récupérer. A la réception, on utilise une boucle à asservissement de phase afin de régénérer une porteuse de sortie qui n'ait pas de différence de phase avec le signal d'entrée. Ceci n'était pas possible dans la modulation à porteuse supprimée, car, comme on le voit dans un diagramme de Fresnel, représentant la différence de phase entre le signal reçu et le signal en sortie de la boucle d'asservissement chargée de régénérer la porteuse seule, le vecteur moyen est nul (car très instable) et il est difficile de lire $\Delta\phi$ et de connaître son signe. Au contraire, dans un diagramme de Fresnel, la porteuse d'entrée est fixe et possède un certain module. Le fait que deux signaux de pulsation $\omega_0 \pm \omega$ tournent autour de celle-ci en se compensant en moyenne, n'empêche pas la lecture de la différence de phase, car la porteuse a toujours une amplitude moyenne positive.

Rapport signal sur bruit : Dans le cas de la modulation à porteuse supprimée ce rapport après démodulation et filtrage vaut 2 fois le rapport signal sur bruit à l'entrée :

$$\frac{S}{N_b} = 2 \frac{S}{N_B}$$

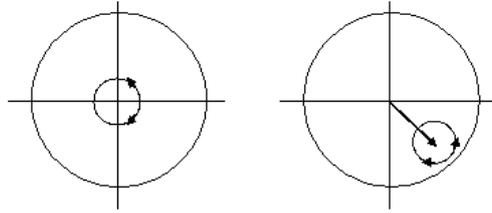


FIG. 13 – Diagramme de fresnel représentant la tension d’entrée reçue de fréquence F_e en fonction de la porteuse générée à la réception par la PLL de fréquence F_s . A droite : cas de la porteuse supprimée. A gauche : cas de la porteuse atténuée

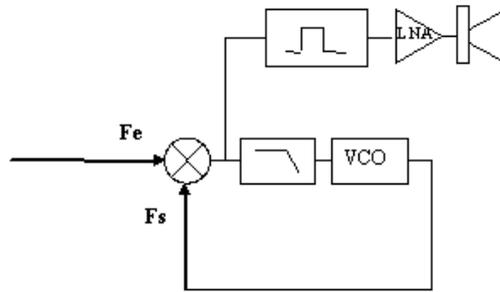


FIG. 14 – Schéma d’une PLL (Phase Lock Loop)

3.3 La modulation d’amplitude à porteuse conservée

3.3.1 Principe de la modulation

Ce type de modulation est une amélioration du cas de modulation d’amplitude précédent. En effet, après multiplication de la porteuse par le signal modulant, on rajoute au signal obtenu la porteuse. Soit un signal modulé $s(t) = (1 + m \cdot x(t)) \cos(\omega_0 t)$. où m , appelé facteur de transmission, est compris entre 0 et 1. (par exemple il est de 30% pour France Inter). De la sorte le spectre du signal modulé est le suivant :

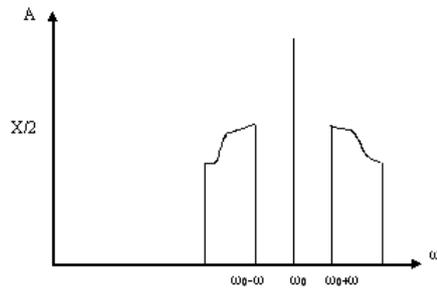


FIG. 15 – Spectre d'émission continu - modulation d'amplitude à porteuse conservée

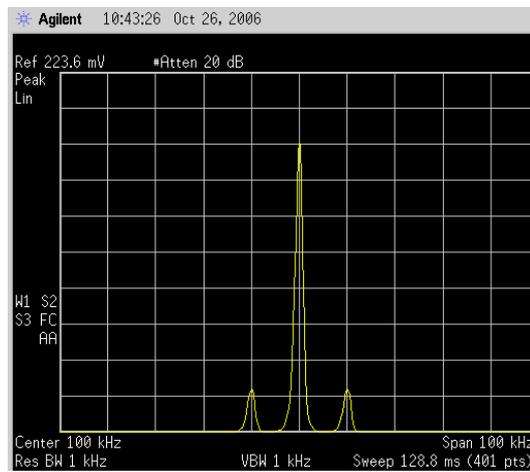


FIG. 16 – Spectre d'émission - porteuse conservée

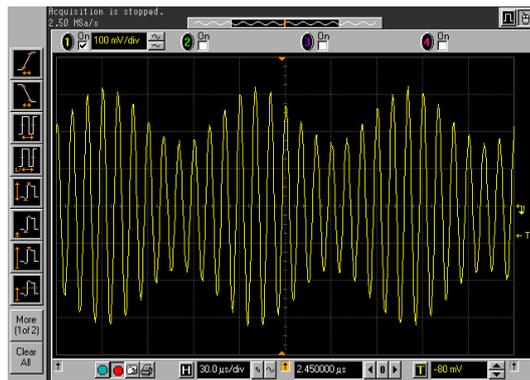


FIG. 17 – Signal émis - porteuse conservée

Expérience $\omega_0 = 100\text{kHz}$ $\omega = 1\text{kHz}$ Amplitude porteuse = 1 Vpp Facteur de transmission ($m=0.3$ 30%) \Rightarrow amplitude des deux raies spectrales = 15%

3.3.2 La démodulation

La démodulation se fait à l'aide d'un dispositif dit de détection d'enveloppe. Le schéma d'un tel dispositif est le suivant :

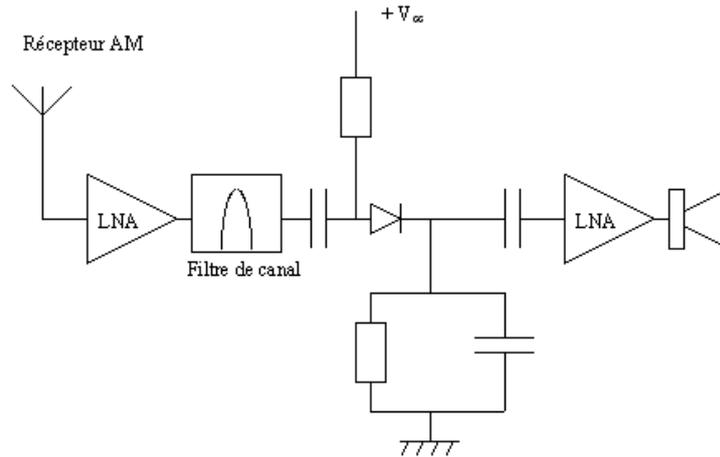


FIG. 18 – Schéma d'un détecteur d'enveloppe

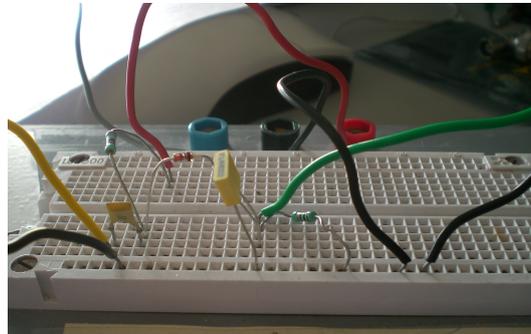


FIG. 19 – Montage d'un détecteur d'enveloppe

Le montage se comporte comme un suiveur quand on approche d'une crête, c'est-à-dire quand la tension est supérieure à la tension de seuil de la diode. En suite à lieu la décharge du condensateur, jusqu'à la détection de la crête suivante. Cette technique n'aurait pas été possible dans le cas de la démodulation à porteuse supprimée car on s'appuie sur le fait que le signal est « décalé » positivement en amplitude d'un facteur $+1$.

Rapport signal sur bruit : Dans le cas de la modulation à porteuse conservée ce rapport après démodulation et filtrage vaut $2/3$ fois le rapport

signal sur bruit à l'entrée :

$$\frac{S}{N_b} = \frac{2}{3} \frac{S}{N_B}$$

L'intérêt de la modulation à porteuse conservée est la facilité de la démodulation. En effet à l'heure actuelle, les puces permettant une détection d'enveloppe sont à faible coût et efficaces.

3.4 La modulation angulaire

Basées sur le même principe que la modulation en amplitude, on touche cette fois à l'angle dans le signal qu'on envoie, on y insère $x(t)$. Les différences avec les modulations d'amplitude sont qu'au prix d'une bande passante plus grande, on diminue le rapport signal sur bruit, et donc on assure une haute qualité de transmission.

3.4.1 La modulation en phase

Cette fois on transmet le signal

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \text{ avec } \phi(t) = KX \cos(\omega t)$$

Le produit $KX = U$ est appelé indice de modulation. En terme d'analyse spectrale, ce signal se développe en série de Bessel sous forme :

$$s(t) = A_0 [J_0 \cos(\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(U) \cos((\omega_0 + n\omega)t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(U) \cos((\omega_0 - n\omega)t)]$$

Bien sûr, l'expression réelle n'est pas d'utilisation la plus facile, c'est pourquoi pour vérifier nos résultats, nous avons utilisé la méthode graphique :

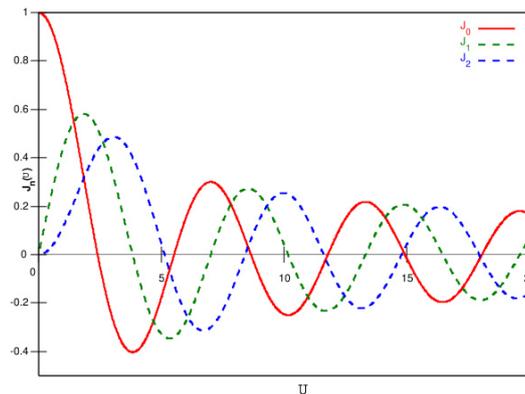


FIG. 20 – Fonctions de Bessel de première espèce

Quand on calcule le spectre de puissance, on voit que la largeur du spectre dépend de l'amplitude de modulation et n'est plus constante, contrairement aux modulations d'amplitude.

Pour opérer une démodulation PM, on utilise comme pour une AM un mélangeur, non pas en multipliant par un *cos* mais cette fois par un *sin*. On trouve alors après multiplication :

$$s(t) \cdot \sin(\omega_0 t) = 1/2(\sin(\phi(t)) + \sin(2\omega_0 t + \phi(t)))$$

On utilise un sinus plutôt qu'un cosinus pour ses propriétés de calcul en approximation ($\sin(\phi(t)) \approx \phi(t)$). Les raies sont séparées de $F = \frac{\omega}{2\pi}$.

Après démodulation, le rapport signal sur bruit vérifie :

$$\frac{S}{N_{PM}} = \frac{S}{N_{AM}} \cdot \frac{U^2}{2}$$

Expérience $\omega_0 = 100\text{kHz}$ $\omega = 10\text{kHz}$

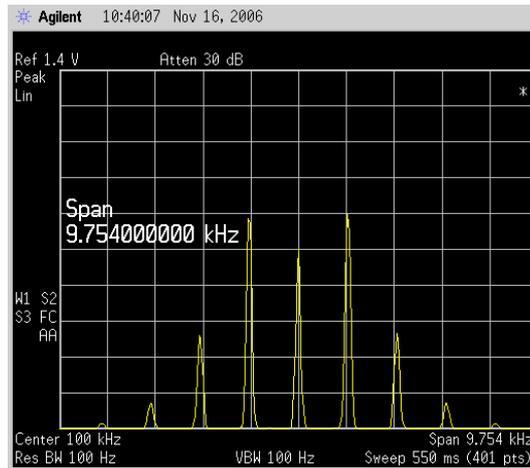


FIG. 21 – Spectre d'émission - modulation de phase

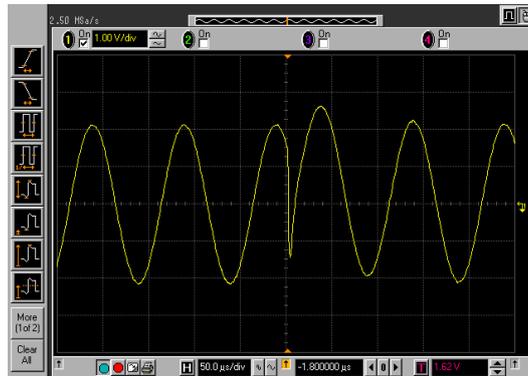


FIG. 22 – Observation d'un saut de phase de π - modulation de phase

Dans la pratique, pour moduler le signal, on utilise un filtre variable sur la porteuse qui modifie la phase par changement d'origine. Ce filtre modifie également le gain, c'est pourquoi on utilise en sortie du filtre un écrêteur afin de conservé un signal à amplitude constante.

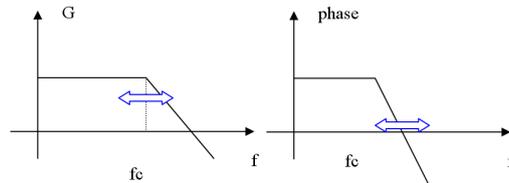


FIG. 23 – Diagramme de Bode - modulation de phase

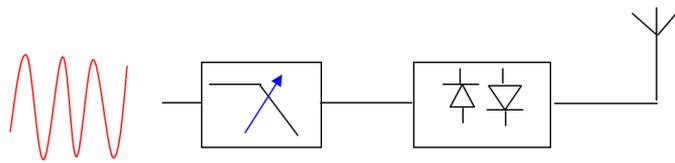


FIG. 24 – Principe analogique de la modulation de phase

3.4.2 La modulation en fréquence

C'est cette fois à la fréquence qu'on impose le signal $x(t)$:
 $s(t) = A \cos(\omega(t)t + \phi_0)$

Expérience $\omega_0 = 1\text{Mhz}$ $\omega = 10\text{kHz}$

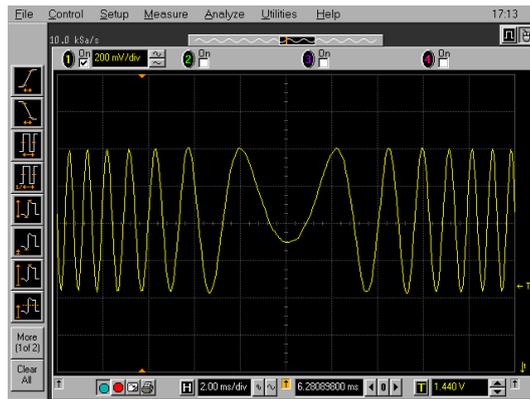


FIG. 25 – Observation d'une modulation de fréquence

Dans l'hypothèse $\phi_0 = 0$ et avec $\omega(t)t = \omega_0 t + Kx(t) \approx \omega_0 + K \int x(t)dt$
 On peut définir l'indice de modulation en fréquence

$$U_{FM} = \frac{KX}{\omega}$$

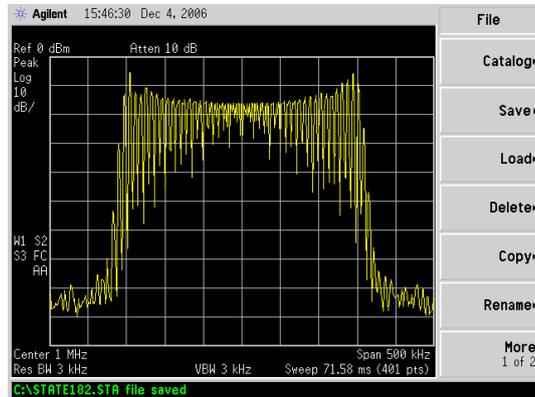


FIG. 26 – Spectre - modulation de fréquence

, qui dépend non plus seulement de l'amplitude comme en modulation de phase, mais aussi de la fréquence du signal à transmettre.

Sur les écrans d'expériences, on observe les limites des appareils de mesures que nous avons utilisé. En effet, l'analyseur de spectre n'arrivait pas à suivre la variation de pulsation : on observe une "infinité" d'états successifs statiques.

$$\frac{S}{N_{FM}} = \frac{S}{N_{AM}} \cdot \frac{3U^2}{2}$$

Ceci est un gain de modulation.

3.4.3 Comparaison des méthodes angulaires

Les indices de modulations des modulations de phase restent constants, donc la bande spectrale du spectre variant comme la fréquence croît avec cette dernière. Pour la modulation de fréquence, la division par ω assure une quasi-constance de la largeur du spectre. C'est l'intérêt de la modulation FM.

Les autres problèmes que présentent les méthodes sont que pour la PM, le bruit de phase engendre des retards des différents paquets d'ondes et on doit alors diminuer le débit d'information. Pour la FM, dans la gamme des aigus, le nombre d'harmoniques est faible, et donc le rapport signal sur bruit aussi. La solution est de préaccentuer les aigus (relever le spectre). En effet on remarque sur le diagramme de Bessel que si U diminue, le nombre d'harmoniques aussi, mais l'écart entre deux raies augmente.

4 Applications actuelles de ces techniques de transmission

4.1 Différence Analogique-Numérique

Durant nos manipulations nous avons utilisé des appareils analogiques ou numériques. De plus, nous avons également vu que certaines méthodes étaient plus adaptées pour des traitements numériques. Enfin, à l'heure actuelle, les puces électroniques étant à faible coût, le traitement de signal se fait quasi-systématiquement à l'aide du numérique.

4.1.1 Numérique

L'adjectif numérique se rapporte à toute donnée qui ne peut avoir qu'un nombre limité et prédéterminé de valeurs discrètes et qui est représentée par des chiffres.

Un système numérique est un système qui utilise les nombres, bien souvent le système binaire, afin de traiter, de transmettre, de stocker ou d'afficher des informations, plutôt que d'utiliser un spectre continu de valeurs (un système analogique).

Le mot numérique est le plus souvent employé dans l'informatique et l'électronique, surtout lorsque les informations (les signaux) sont converties au format binaire. De tels signaux peuvent transmettre deux types de pulsations électroniques : 0 ou 1.

4.1.2 Analogique

L'analogique est une méthode de transmission par laquelle l'information est transmise sous la forme de variations continues d'une grandeur physique (fréquence, phase, amplitude). Le concept d'analogique est utilisé par opposition à celui de numérique. Le nom provient de l'utilisation originale de l'électronique analogique comme calculateur : il existe une analogie entre système mécanique et système électronique. On utilisait l'électronique analogique pour résoudre les équations différentielles rencontrées entre autre dans des problèmes de mécanique. Bien sûr cette technique est obsolète, mais le nom demeure. Une grandeur physique, telle une tension électrique, une position dans l'espace, une certaine hauteur d'un liquide, etc, sont des valeurs analogiques. Bien sûr, elles peuvent être mesurées et donc représentées par des chiffres, mais ceux-ci resteront obligatoirement accompagnés de la désignation de la valeur pour une compréhension correcte.

Une montre analogique utilise la rotation d'aiguilles pour indiquer l'heure, les minutes, les secondes, par opposition à une montre numérique qui affiche directement des chiffres.

L'électronique analogique est un système électronique qui met en jeu des courants et tensions électriques variant dans des limites fixées, mais sans

paliers, ni niveaux prédéfinis, contrairement à l'électronique numérique. La grandeur analogique étudiée peut prendre une infinité de valeurs continues, alors qu'une grandeur numérique ne peut que prendre des valeurs discrètes.

4.2 Technique de modulation moderne

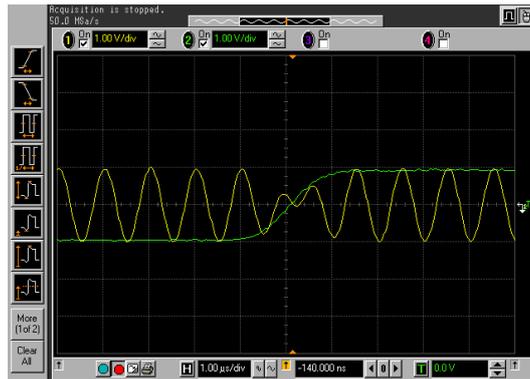


FIG. 27 – Cas de deux états de phase - saut de phase de π

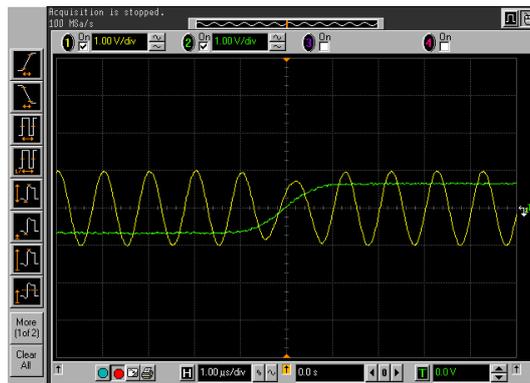


FIG. 28 – Cas de 4 états de phase - saut de phase de $\pi/2$

On utilise la modulation numérique en bande de base, le signal modulant n'a qu'un nombre fini d'états possibles, puissance de deux dans la plupart des cas. Par exemple avec deux états, on pourra coder 1 bits, avec 4 2 bits etc ... On peut ainsi coder n bits par des sauts de phases de $\frac{2\pi}{n}$.

Pour la modulation de phase, on fixe $I = \cos(\phi)$ et $Q = \sin(\phi)$, I et Q sont les voies en phase et en quadrature. La zone autour de chaque état est une zone de bruit, principal problème des modulations à grand nombre d'états.

Un saut de phase correspond à une "impulsion" infinie de phase. Dans le deuxième cas, on a appliqué un filtre en un sur racine de cosinus pour réduire la bande passante. En effet dans le premier cas la bande passante

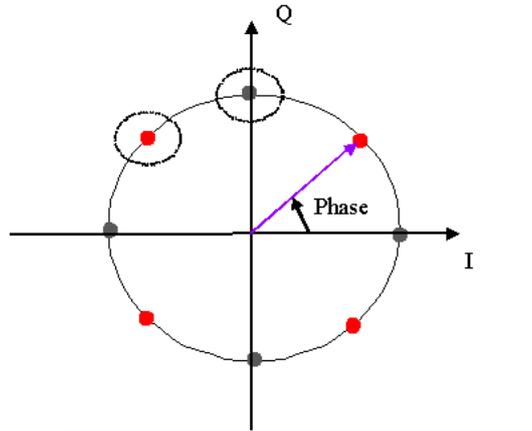


FIG. 29 – Cas de 8 états de phase saut de $\pi/4$ - modulation de phase

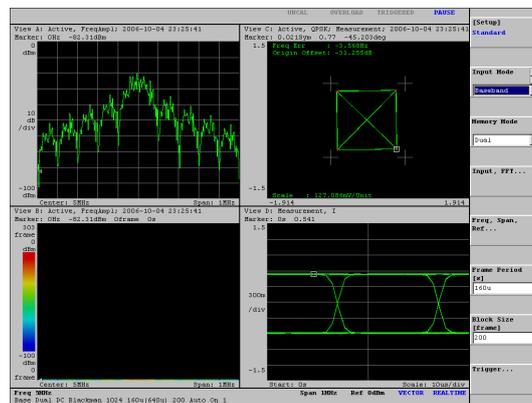


FIG. 30 – Analyseur de spectre vectoriel - modulation de phase sans filtre - 4 états

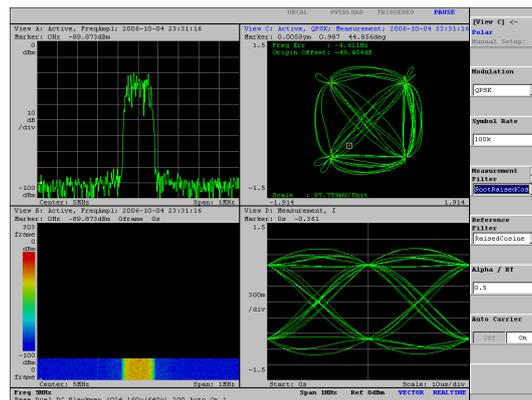


FIG. 31 – Analyseur de spectre vectoriel - modulation de phase avec filtre - 4 états

est infinie ce qui permet de repérer avec grande précision les changements discrets de phase. Toutefois, on ne dispose pas toujours de la totalité de la bande passante (si on a plusieurs informations à transmettre par exemple). C'est pourquoi on réduit cette bande passante.

Dès qu'on dépasse quatre états, ce codage devient de plus en plus difficile à réaliser.

4.3 La modulation de la radio

On a bien remarqué qu'il existait plusieurs stations de radio, selon la fréquence sur laquelle on se place, à plus ou moins quelques iotas autour de la fréquence prévue (c'est en fait 0,2MHz en FM). La modulation utilisée est la FM à porteuse supprimée pour assurer la transmission du canal stéréo centré en 38 MHz. Il faut régénérer la porteuse (atténuée) en $f = 19\text{MHz}$ pour démoduler le signal selon les méthodes vues précédemment.

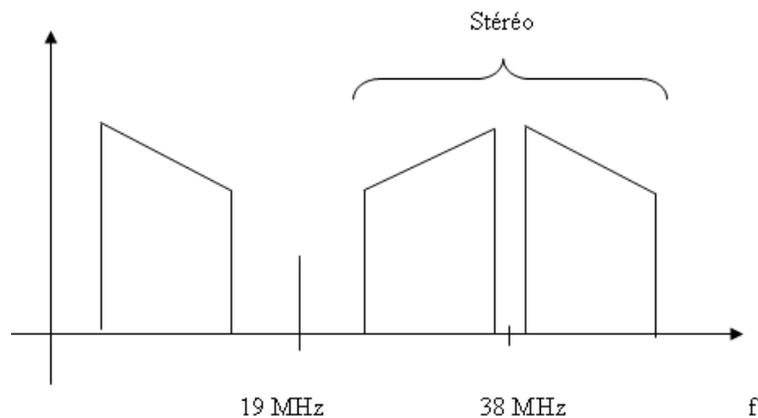


FIG. 32 – Représentaion spectrale d'un signal radio

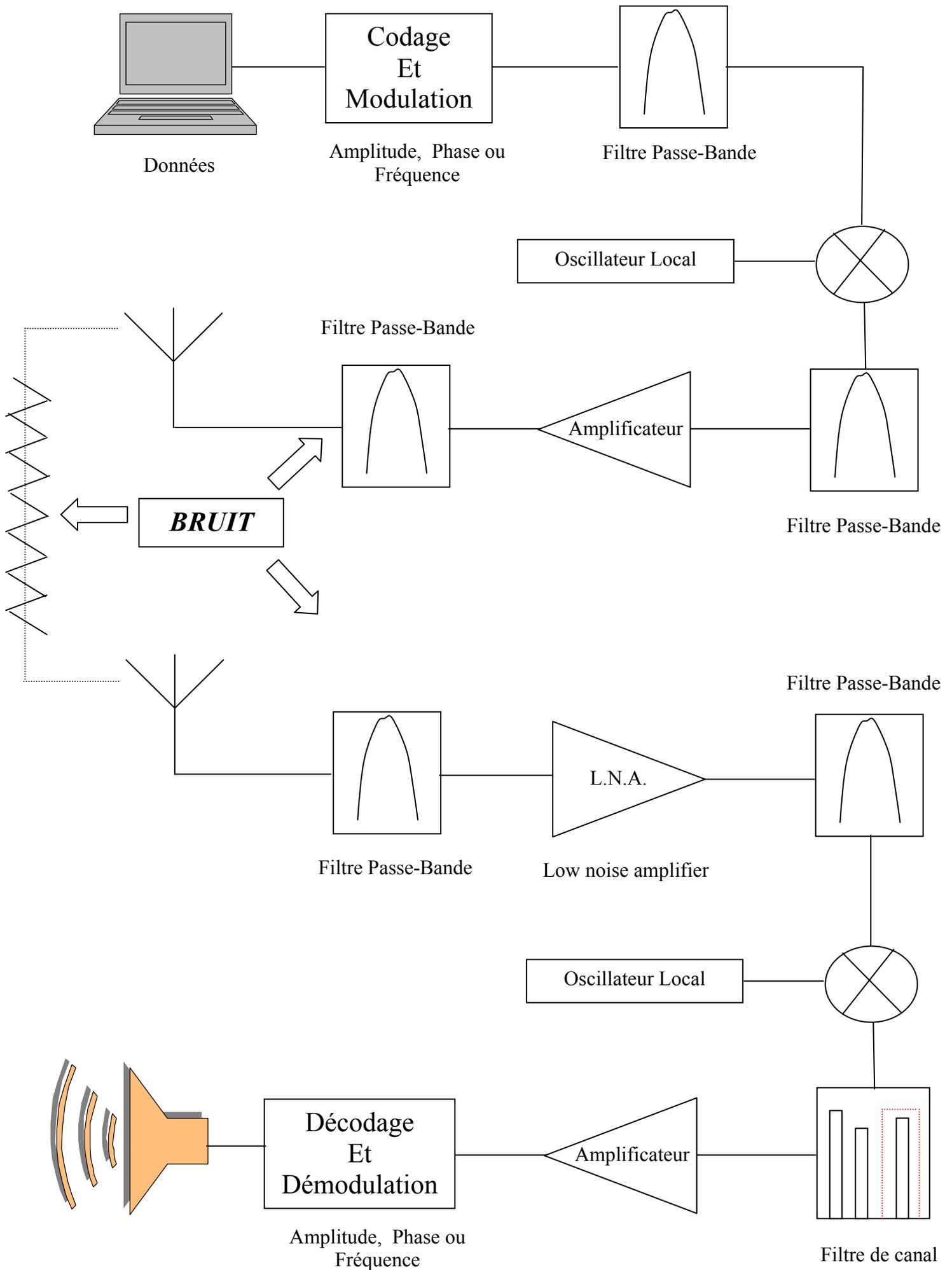
4.4 Les normes actuelles de transmissions

De nos jours les appareils électroniques utilisent différentes normes de transmission.

- La radio utilise les modulations AM et FM, vues précédemment.
- Le téléphone utilise la norme GSM suivant la modulation GMSK, de type modulation de fréquence.
- L'infrarouge utilise la PPM, on envoie des impulsions à amplitude constante et la position de l'impulsion représente les bits.

- Le wifi utilise la FHSS ou la DSSS, une méthode de découpage en bandes de fréquence ou saut de phase et une méthode de redondance des codes (11 bits pour coder 1 bits). Au début réservé à l'usage militaire, c'est la norme utilisée aujourd'hui par tous.
- Le bluetooth utilise le GFSK, de type modulation de fréquence comme le wifi.

A Schéma d'une chaîne d'émission réception



B Conclusion

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la transmission d'informations et nous avons été sensibilisés au fait qu'il fallait utiliser diverses méthodes pour pouvoir transmettre plusieurs informations en même temps. Ainsi, nous avons étudié diverses méthodes de modulation applicables à la fois aux technologies filaires et sans fils. Nous avons pu observer que les différents types de modulation jouaient sur l'amplitude ainsi que sur l'étalement spectral du signal, et qu'elles étaient plus ou moins complexes à mettre en oeuvre. Grâce à la réalisation de notre antenne AM, nous avons constaté qu'on pouvait réaliser un récepteur de base avec une diode, un condensateur et un fil enroulé faisant office d'antenne. Par ailleurs, quelque soit le signal réel observé, nous avons constaté l'existence du phénomène de bruit qui régit les paramètres limites de la transmission de l'information.

Ce travail nous a permis de répondre aux nombreuses questions concernant à la fois la transmission d'un signal et son émission-réception dans la chaîne électronique. Les manipulations expérimentales nous ont confirmé les différentes théories mises en place, ce qui a donné au problème une dimension concrète fort intéressante. Nous remercions à ce sujet Monsieur Etienne Perrin de nous avoir enseigné les diverses théories et méthodes expérimentales, et d'avoir répondu avec patience et pédagogie à nos questions.

C Bibliographie

- Livres :
 - Fonctions électronique pour le traitement et la transmission du signal,
J. Farré, F. Laverne
 - Electronique appliquée à la transmission de l'information - Tome II -
Principe et réalisation des systèmes de communication - J. Hervé
 - Théorie du signal - Ph. Refrégier

- Sites internet :
 - <http://www.wikipedia.fr/>
 - <http://www.commentcamarche.net/>
 - <http://www.agilent.com/>