UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Montage de l’émetteur-récepteur à partir des composants électroniques disponibles au marché local

Nahimana, Zébulon; Sous la direction : Dr Nakimana Agnès

2025-03
UB, ENS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2060

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI-ECOLE NORMALE SUPERIEURE

INSTITUT DE PEDAGOGIE APPLIQUEE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE-TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES NATURELLES
SECTION DE PHYSIQUE-TECHNOLOGIE

MASTER CONJOINT EN DIDACTIQUE DES SCIENCES

OPTION : PHYSIQUE

MONTAGE DE L'EMETTEUR-RECEPTEUR A PARTIR DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES DISPONIBLES AU MARCHE LOCAL

Par

NAHIMANA Zébulon

Sous la direction

Dr NAKIMANA Agnès

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue d'obtenir un Diplôme de Master **en Didactique des sciences**

BUJUMBURA, Mars 2025

COMPOSITION DU JURY

Dr MANIRAKIZA Célestin (Président du Jury)

Dr NGENDABANYIKWA Donatien (Secrétaire du Jury)

Dr NAKIMANA Agnès (Directeur de mémoire)

DEDICACES

A mon regretté père ;

A ma regrettée mère ;

A ma tante ;

A mes frères ;

A ma sœur ;

A mon regretté petit frère ;

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout, Dieu qui m'a donné la vie et la force pour réaliser ce travail.

Je tiens d'abord à remercier toute l'équipe Poly disciplinaire de l'IPA et de l'ENS qui m'a permis d'acquérir cette formation, m'a encouragé et m'a guidé durant les études.

Je présente mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé, en contribuant à l'aboutissement de ce maitrise, en particulier mon directeur de mémoire Dr Agnès NAKIMANA actuellement directeur de recherches à l'ENS. Je lui remercie du fond du cœur de m'avoir fait l'honneur de diriger ce mémoire. Merci pour la patience et la confiance accordées tout au long de ce parcours de recherche. Vos conseils scientifiques et pédagogiques m'ont, à chaque fois, apporté la motivation nécessaire à l'avancement de mes travaux sans oublier vos qualités humaines qui m'ont permis d'être à l'aise pendant la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à l'équipe des chercheurs physiciens de l'IPA et de l'ENS pour avoir analysé, puis validé mon sujet de mémoire et à tous les examinateurs d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je remercie également l'équipe des ingénieurs du laboratoire de Génie électrique de l'ENS pour les discussions scientifiques et surtout pratiques sur le sujet ainsi que pour leur gentillesse.

Je remercie Mr NTAHOMVUKIYE Mélance et Marius NAKINTIJE pour leurs plus meilleures contributions pratiques et analytiques.

Je remercie du fond du cœur mon collègue et ami Bienvenu NTAKIRUTIMANA pour sa solidarité, sa confiance, ses encouragements durant les moments agréables et difficiles que nous avons partagé au cours de la recherche.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres de ma famille qui n'ont jamais hésité à m'offrir le meilleur pour mes formations.

RESUME

Le présent travail de recherche vise à réaliser le montage d'un émetteur-récepteur à partir des composants électroniques se trouvant sur le marché local au Burundi.

Pendant nos recherches, nous avons trouvé qu'un système de radio communication dispose un circuit émetteur qui capte le son ou signal pour le converti en signal électrique oscillant à haute fréquence. Puis, il le traite et l'émet par antenne émettrice sous forme d'ondes. A la réception, circuit récepteur détecte ces ondes grâce à l'antenne réceptrice, il les traite pour restituer information originale dans le haut-parleur. En raison de composants de faible puissance, le montage a donné un prototype de radiocommunication. Comme tout système de radio communication, notre prototype est constitué de deux parties principales, «le circuit émetteur et le circuit récepteur. » Le traiteur émetteur (ou circuit émetteur) de ce prototype, est constitué de principaux circuits suivant: le capteur principal/ transducteur ou ADIP16-Z-LC-R, le générateur d'oscillations (Oscillateur X_1 ou Crystal), le mélangeur ou modulateur fait par une diode et une inductance variable, les amplificateurs a émetteur commun ou convertisseur de survolteur et l'antenne d'émission avec une alimentation de 9V. Le traiteur récepteur (ou circuit récepteur) du même prototype est constitué de l'antenne réceptrice, du régulateur de tension U_2 7809, du démodulateur/CD2003GP (composant multifonctionnel) et les amplificateurs tels que LM393, ADIP16 Z-LC-R, JRC4558 et TDA7379 avec une alimentation de 12V qui est régulée en 9V.

Comme résultat du travail de recherche, l'émetteur du prototype de radio communication monté, émet un signal de 0.2Watts (puissance théorique) jusqu' à 4m ou il peut être capté par le récepteur du même prototype. Cette puissance est rayonnée par les ondes de1m de longueur d'onde environ.

Mots clés : Emetteur, Récepteur, radio et ondes, modulation et démodulation.

ABSTRACT

The present research work aims to assemble a transceiver from electronic components on the local market in Burundi.

During our research, we found that a radio communication system has a transmitter circuit that picks up sound or signal and converts it into a high-frequency oscillating electrical signal. Then, it processes it and transmits it by transmitting antenna in the form of waves. At reception, the receiver circuit detects these waves thanks to the receiving antenna, it processes them to restore original information in the speaker. Due to low-power components, the assembly resulted in a prototype of radio communication. Like any radio communication system, our prototype consists of two main parts, "the transmitter circuit and the receiver circuit." The transmitter (or transmitter circuit) of this prototype, consists of the following main circuits: the main sensor/transducer or ADIP16-Z-LC-R, the oscillation generator (X1 or Crystal oscillator), the mixer or modulator made by a diode and a variable inductor, the amplifiers with common transmitter or booster converter and the transmitting antenna with a 9V power supply. The receiver (or receiver circuit) of the same prototype consists of the receiving antenna, the U2 7809 voltage regulator, the demodulator/CD2003GP (multifunctional component) and amplifiers such as LM393, ADIP16 Z-LC-R, JRC4558 and TDA7379 with a 12V power supply that is regulated in 9V. As a result of the research work, the transmitter of the mounted radio communication prototype, emits a signal of 0.2Watts (theoretical power) up to 4m or it can be picked up by the receiver of the same prototype.

This power is radiated by waves of about 1 m wavelength.

Keywords: Transmitter, Receiver, radio and waves, modulation and demodulation.

TABLE DE MATIERES

COMPOSITION DU JURY i

DEDICACES ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DE MATIERES vi

LISTE DES FIGURES OU CIRCUITS ET DES COMPOSANTS ESSENTIELS ix

LISTE DE TABLEAU x

LISTE DES SIGLES OU ABREVIATIONS ET SYMBOLES xi

AVANT-PROPOS xii

I. INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDES RADIO 3

I.1. Préliminaires 3

I.2. Ondes électromagnétiques 5

I.2.1. Ondes électromagnétiques stationnaires 5

I.2.2. Ondes électromagnétiques libres 6

I.2.3. Polarisation des ondes électromagnétiques 8

I.2.4. Impédance intrinsèque 11

I.2.5. Vitesse de propagation des ondes 11

I.3. Phénomènes de propagation 12

I.3.1. Propagation en espace libre 14

I.3.2.La propagation hors espace libre 16

I.4.CAnal de propagation radio mobile 16

I.4.1. Caractérisation du canal de propagation 17

I.4.2.Dispersions dans les canaux 22

I.4.3.La sélectivité des canaux 24

I.4.4. Diversité de canal 24

I.4.5.Capacité du canal 26

I. 5. Conclusion 27

CHAPITRE II. MODULATION DES ONDES RADIO 28

II.1. Introduction 28

II.2.Principe de la modulation 28

II.3. Types de modulation d'une onde radio 29

II.3.1. Modulation d'amplitude 29

II.3.2. La démodulation par détection d'enveloppe du signal modulé 31

II.3.3. Modulation de fréquence (FM) 32

II.3.4. Indice de modulation 34

II.3.5.La démodulation de fréquence 34

II.3.6. Modulation de phases 35

II.4. Conclusion 37

CHAP III. MONTAGE DE L'EMETEUR-RECEPTEUR 38

III.1. Méthodologie 38

III.2. Les principales parties de l'émetteur-récepteur 39

III. 2.1. Principaux composants de l'émetteur 39

III.2.1.a. Montage 44

III.2.1.b. Les Caractéristiques d'un émetteur 45

III.2.1.c. La fonction générale d'un émetteur radio 46

III.2.2. Les principaux composants du récepteur 46

III.2.2.a. Le montage 51

III.2.2.b. Caractéristiques du récepteur 53

III.2.2.c. Fonctionnement 54

III. 3. Conclusion 55

CHAPITRE IV. CONCLUSION GÉNÉRALE 56

REFERENCES 58

LISTE DES FIGURES OU CIRCUITS ET DES COMPOSANTS ESSENTIELS

Fig. I.1. Exemple de l'onde à la surface d'une étendue de l'eau [58,59] 3
Fig. I.2. Spectre radiofréquence [8] 4
Fig. I.3. Représentation de l'onde électromagnétique libre [58, 59] 7
Fig. I.4.Polarisation rectiligne [8] 9
Fig. I.5. Polarisation elliptique [8] 11
Fig. I.6. Polarisation circulaire [8] 11
Fig. I.7. Influence de localisation spatiale des diffuseurs sur la réponse du canal [5] 13
Fig. I.8. Modélisation de l'espace libre [5] 15
Fig. I.9. Puissance reçue en fonction de la distance [5] 20
Fig. I.10. Spectre Doppler [5] 23
Fig. II.1.Modulation d'amplitude [8] 29
Fig. II.2.Signal modulé [8] 30
Fig. II.3. Modulation de phase [8] 36
Fig. III. 1. Schéma simplifié d'un système de radiocommunication [8] 39
Fig. III.2. Capteur principal $\boldsymbol{J1}$/ADIP16-G-LC-R ou Transducteur 40
Fig. III.3. Quartz $\boldsymbol{X1}$/Cristal 249.6MHz : Générateur d'oscillations de 249.6MHz 41
Fig. III.4. Amplificateurs /Convertisseur de survolteur (chaine à transistor$\boldsymbol{Q1\ et\ Q2}$) 43
Fig. III.5. Le montage de l'émetteur par soudure avec fer à souder et étain 44
Fig. III.7. Circuit intégré CD2003GP/ ADIP16 Z-LC-R ($\boldsymbol{J1}$) et de l'antenne de réception 47
Fig. III.8. Circuit intègre LM393 $\boldsymbol{U1A}$ Comparateur de tension de sortie. 48
Fig. III.9. Circuit intégré JRC4558/$\boldsymbol{U4}$ 50
Fig. III.10. Amplificateur/Circuit intégrée TDA7379 ($\boldsymbol{J3}$) 50
Fig. III.11. Amplificateur à émetteur commun $\boldsymbol{Q2\ et\ Q3}$. 51
Fig. III.12. Le montage de récepteur par soudure avec fer à souder et étain 52
Fig. III.13. Photo du récepteur encaissé dans la boite (a) et l'intérieur de la boite (b) 53
Fig. III.14. Photo de l'émetteur (a) et du récepteur (b) 54

LISTE DE TABLEAU

Tableau II.1. Valeur de la variable α en fonction du type d'environnement [5] **.....*19***

LISTE DES SIGLES OU ABREVIATIONS ET SYMBOLES

1. B_c : *Bande de cohérence*
2. D_c : *Distance de cohérence*
3. D_t *ou* D_f : *Diversité temporel ou diversité fréquentielle*
4. T_s*ou* B_s : *temps ou Bande du signal*
5. U_p, A_p *ou* A : *Amplitude de la porteuse ou Amplitude*
6. t_c *ou* B_c : *Temps ou Bande de cohérence*
7. ω_p : *pulsation de l'oscillation porteuse a la fréquence plus élevée*
8. ε : *permittivité diélectrique du milieu*
9. *AM* : *Modulation d'Amplitude*
10. *C.I* : *Circuit Integré*
11. *ENS* : *Ecole Normale Supérieure*
12. *FM* : *Modulation de fréquence*
13. *GHz* : *Gigahertz*
14. *IPA* : *Institut Pédagogique Appliqué*
15. *KHz* : *Kilohertz*
16. *LC* : *Circuit LC*
17. *MHz* : *Mégahertz*
18. *MIMO/SIMO* : *Multiple/Single input Multiple output*
19. *RC* : *Circuit RC*
20. *RF* : *Radio frequency*
21. *T.V* : *Télévision*
22. *UB* : *Université du BURUNDI*
23. *USB* : *Clé USB*
24. *WMAN* : *Wireless Metropolitan Area Network*
25. *WPAN* : *Wireless Personal Area Network*
26. *B* : *Champ induction magnétique*
27. *E* : *Champ électrique*
28. *H* : *Champ magnétique*
29. *IFT* : *Inductance Variable*
30. μ : *perméabilité du milieu*
31. ω : *pulsation des signaux oscillant*

AVANT-PROPOS

La formation en Master conjoint entre l'Ecole Normale supérieure (ENS) et l'institut de pédagogie appliquée (IPA) que j'ai reçue est soumise à une contrainte académique : la rédaction d'un travail de recherche. En effet, elle exige aux Étudiants vers la fin de formation, de rédiger un mémoire dans le but de s'intégrer dans la recherche. C'est dans cet optique où s'inscrit mon travail de recherche intitulé « Montage d'un émetteur-récepteur à partir des composants électroniques disponibles au marché local ».

L'objectif principal de cette recherche est de monter un émetteur-récepteur à partir des composants électroniques disponibles au marché local. L'atteint de cet objectif prouvera qu'il est localement possible de concevoir, de développer et d'améliorer des technologies électroniques comprenant les systèmes de transmission-réception sans fils pouvant être complet et fiables. Spécifiquement, avec des appuis financiers, l'objectif est de réaliser un montage de type réel (d'une radiodiffusion ou d'un téléphone portable) à partir des composants électroniques de puissance disponibles au marché local.

Mon étude s'articule sur la question principale de chercher comment, à partir des composants électroniques disponibles au marché local, on peut avoir un émetteur-récepteur localement monté et fonctionnel et son intérêt sur le développement socio-économique de la population locale (Burundaise).

Pour y arriver plusieurs étapes et méthodologies ont été utilisés dans cette recherche. Ce mémoire pourrait aider à avoir des systèmes électroniques localement montes et diminuer les coûts ou dépenses des produits ou systèmes finis importés et augmenter la production nationale à côté de la valeur monétaire ou devises à travers les exportations.

I. INTRODUCTION GENERALE

L'électronique a permis le développement des réseaux de transmission ou de télécommunication qui utilisent les différents supports pour l'acheminement d'une information et de connecter des personnes ou des systèmes très rapidement à différentes distances ou aux quatre coins du monde [1, 2]. Cependant, ici au Burundi, ces réseaux sont loin d'être montés.

L'émetteur et le récepteur sont des systèmes électroniques souvent utilisés pour communiquer et pour assurer l'achemination rapide des informations à des distances différentes en modulant et démodulant l'onde électromagnétique [3, 4]. Cependant, les ondes électromagnétiques radio ou ondes radio ont des propriétés relatives à leur comportement dans le milieu réel qui sont nécessaires et à considérer pendant la mise en place des liens sans fil stables et à haut débit [5, 6, 7].

L'émetteur ou le récepteur est soumis à des différentes contraintes d'utilisation telle que l'intégration, le débit, la sensibilité, les canaux perturbateurs proches, le bruit, l'évanouissement, le canal de propagation et l'autonomie. Raison pour laquelle, différentes architectures de transmission malgré les contraintes ci-haut citées, devraient être conçues et montées pour répondre au mieux aux besoins des utilisateurs. De telles technologies se sont considérablement dynamisées et amplifiées de telle sorte qu'elles sont susceptibles d'augmenter l'exposition de la population en générale ou des usagers ce qui suscite de multiples questions (utilisation, métrologie, effets biologiques et cliniques, épidémiologie, règlementation, etc....) [8]. Grâce aux composants électroniques et leur adjancément appris au cours de notre formation (BAC et MASTER), il est localement possible de concevoir, de monter, de développer et d'améliorer des technologies électroniques comprenant les systèmes de transmission-réception sans fils pouvant être complet et fiables. C'est l'objectif de notre travail de recherche. Spécifiquement, avec des appuis financiers, l'objectif est réaliser le montage de type réel (d'une radiodiffusion ou d'un téléphone portable) à partir des composants électroniques de puissance disponibles au marché local. La réussite d'architecture du système de transmission-réception sans fils est la solution au problème observé et pourrait diminuer les coûts ou dépenses des produits ou systèmes finis importés et augmenter la production nationale à côté de la valeur monétaire ou devises à travers les exportations. C'est dans ce cadre que notre travail se rapporte au montage des systèmes électroniques en particulier de l'émetteur-récepteur.

Notre travail est constitué de quatre grandes parties. Dans notre introduction générale, on montre le problématique, les concepts généraux, l'objectif et intérêt de la recherche. Dans le premier chapitre, on présente les propriétés des ondes radio et les phénomènes liés à leur propagation dans les différents milieux et même au canal. Dans le deuxième chapitre, on parle des principes de modulation des ondes radio et de types de modulation. Enfin, le dernier chapitre présente la procédure utilisée lors du montage du prototype de l'émetteur-récepteur, les composants ou circuits en jeux et leurs modes de fonctionnement, le logiciel Isis Proteus utilisé, problème rencontré et le résultat du travail.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDES RADIO

I.1. Préliminaires

Une onde est une propagation d'une vibration ou d'une oscillation (mouvement autour d'une position d'équilibre des particules d'un milieu élastique ou d'un système matériel élastique). Comme indique (**Fig.I.1),** un exemple d'onde est celui qui apparait puis se déplace et disparait à la surface d'une étendue d'eau.

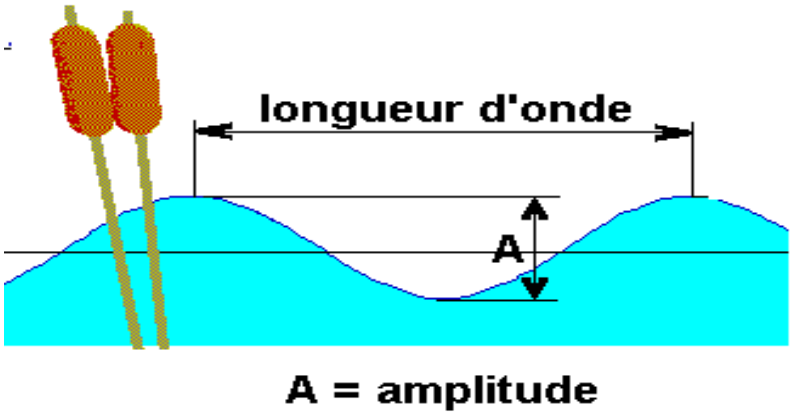


Fig. I.1. Exemple de l'onde à la surface d'une étendue de l'eau [58,59]

La fréquence f d'une vibration est le nombre de cycles complets par seconde que le signal passe par la valeur donnée. [8]

La longueur d'onde est la distance en mètre du signal ou du cycle complet de l'onde.

La variation du niveau de l'eau ou d'Amplitude A, se déplace à une vitesse v relativement constante pour les milieux similaires, en s'éloignant de l'endroit où l'onde a pris naissance. La distance parcourue en une seconde dépend de la vitesse de propagation et la longueur d'onde dépend en plus de la fréquence de vibrations. [8, 9, 10, 11].

Une onde radioélectrique, communément abrégée en onde radio, est une onde électromagnétique dont la fréquence est comprise entre 300KHz et 30GHz comme indique **(Fig. I.2)**, ce qui correspond à des longueurs d'onde dans le vide de 1cm à 1km. [4, 8]

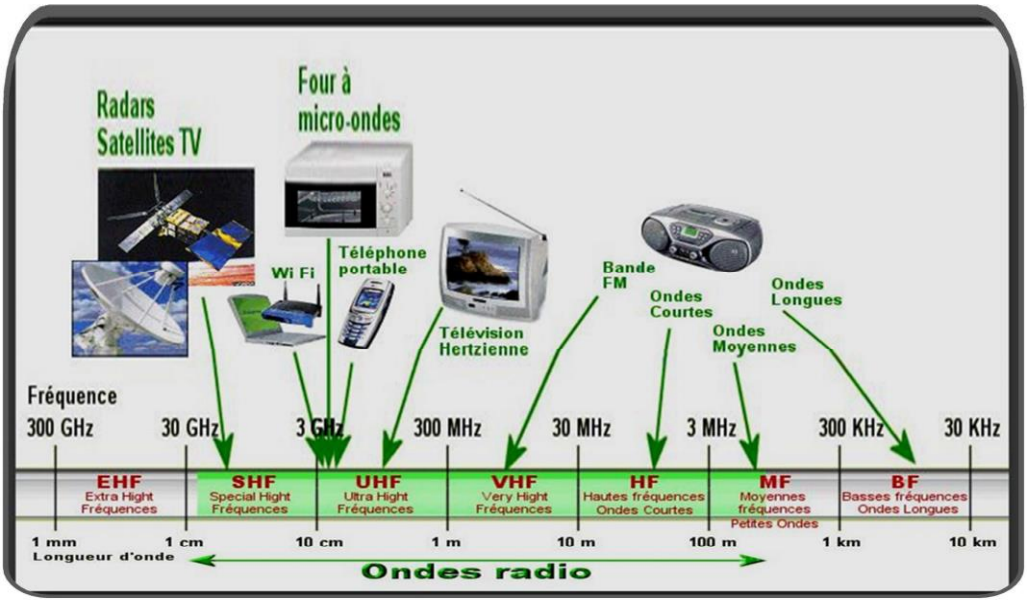


Fig. I.2. Spectre radiofréquence [8]

Pour qu'il y ait le rayonnement des ondes électromagnétiques puissantes, il est nécessaire de produire des courants de déplacement suffisamment intense, c'est-à-dire un champ électrique rapidement variable. C'est pour cette raison qu'en radiotechnique, on utilise des oscillations électriques à haute fréquence qui excitent dans l'antenne des oscillations forcées intenses. Comme l'antenne constitue un oscillateur ouvert, elle rayonne des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace et atteignent l'antenne de la station réceptrice. [12]

Les ondes radio sont classées en fonction de leurs fréquences. L'ensemble de ces fréquences constitue le spectre radiofréquence **(Fig. I.2)**. Ces ondes hertziennes, sont utilisées non seulement pour la radio mais aussi pour la télévision, le téléphone portable en communications sans fil voire le four à micro-ondes, radar satellites, Wi-Fi. Les rayonnements comme la lumière ou les rayons X appartiennent à la grande famille des ondes électromagnétiques.

Un poste radio est un appareil qui capte les ondes radios pour les transformer en son. [8]

I.2. Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques puissantes, sont produites grâce à des courants de déplacement suffisamment intense. Ce courant produit un champ électrique et magnétique rapidement variables à haute-fréquence quand on alimente une antenne (qui rayonnerait l'énergie que communique le courant électrique qui la traverse). En radioélectrique, il est alors bon d'utiliser des oscillations électriques à haute fréquence.

Grâce à ces ondes électriques, en 1895, Popov professeur de physique à l'institut électrotechnique à Saint-Pétersbourg, réalisa l'émission et la réception des signaux à l'aide des ondes électromagnétiques et fit la démonstration de son récepteur radioélectrique. [12]

L'une des applications techniques les plus remarquables des ondes électromagnétiques est leur utilisation en télécommunication. [4, 5, 9, 8,13]

Il existe plusieurs types d'ondes électromagnétiques :

I.2.1. Ondes électromagnétiques stationnaires

Les ondes stationnaires se produisent sur des lignes très longues pratiquement illimitées avec les lignes de force électriques tournant autour des fils. Or, pour plus de lumière, on se sert des lignes courtes, sur lesquelles est étalé un nombre peu élevé de longueur d'ondes. A l'extrémité de la ligne, se produit le phénomène important de réflexion des ondes électromagnétiques puis le phénomène de superposition susceptible de produire autres oscillations électromagnétiques de forme plus complexe appelées ondes électromagnétiques stationnaires. Elles sont analogues à des ondes mécaniques stationnaires qui se produisent sur une corde ou cordon élastique.

Prenons l'axe X, et supposons que les oscillations des champs électriques de l'onde incidente en un point o de la ligne soit régie par une loi sinusoïdale.

$$E_1 = E_o \sin \omega t \qquad \text{(I.1)}$$

En un point x de la ligne,

$$E_1 = E_o \sin(\omega t - kx) \qquad \text{(I.2)}$$

La réflexion de l'onde étant totale, on peut représenter les oscillations des champs de l'onde réfléchie au même point x par la formule,

$$E_2 = E_o \sin(\omega t + kx - \psi) \quad \text{(I.3)}$$

Le signe affectant le terme kx exprime que l'onde est réfléchie et se propage dans le sens négatif de l'axe X et ψ exprime le retard que les oscillations de l'onde réfléchie présentent au point x sur les oscillations de l'onde incidente au même point.

La superposition de ces deux ondes donne un champ résultat

$$E = E_1 + E_2 = E_o [\sin(\omega t - kx) + \sin(\omega t + kx - \psi)] \quad \text{(I.4)}$$

En appliquant la formule trigonométrique des sommes de sinus et en tenant compte que

Cos (-ɑ) = cos ɑ on a:

$$E = 2E_o \cos(kx - \frac{\psi}{2}) \sin(\omega t - \frac{\psi}{2}) \quad \text{(I.5)}$$

La formule montre que la ligne l sera le siège des oscillations harmoniques des champs dont la pulsation est égale à la pulsation ω de l'onde incidente et de la phase $-\frac{\psi}{2}$ et d'amplitude des oscillations :

$$E_\alpha = 2E_o \cos(kx - \frac{\psi}{2}). \quad \text{(I.6)}$$

I.2.2. Ondes électromagnétiques libres

Les ondes électromagnétiques libres existent sans conducteurs. Elles se produisent dans le cas où le dipôle émetteur se trouve entièrement dans l'air et à une distance suffisamment grandes ou élevée de tous les objets environnants [13,14] car leur propagation se déroule dans le milieu/diélectrique environnant le dipôle émetteur. Le conducteur joue un rôle auxiliaire de canaliser les ondes électromagnétiques en déterminant la direction de propagation.

Prenons qu'au point o, se produit un champ électrique, s'il n y a pas des charges électriques qui entretiennent ce champ, il va disparaitre. Pourtant, d'après la théorie de Maxwell, un champ électrique décroissant E engendre un champ magnétique H.

La (**Fig.I.3)** montre que les champs $E\ et\ H$ qui composent des ondes électromagnétiques libres, sont toujours perpendiculaires l'un à l'autre et à la vitesse de propagation v: $H \perp E \perp v$

Ces trois vecteurs sont liés entre eux par la règle de tire-bouchon. Les oscillations du champ électrique et magnétiques sont respectivement

$$E = E_0 \sin \omega(t \mp \frac{x}{v}) \; et \;\; H = H_0 \sin \omega(t \mp \frac{x}{v}) \qquad \text{(I.7)}$$

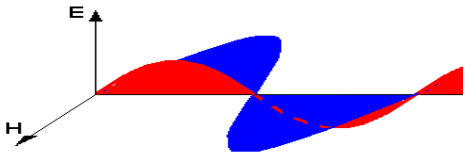


Fig. I.3. Représentation de l'onde électromagnétique libre [58, 59]

a-Equation générale d'onde électromagnétique libres

Les ondes sont décrites par une fonction générale f dépendante de l'argument $(t - \frac{x}{v})$ représentée dans cette équation suivante :

$$S = f(t - \frac{x}{v}), \qquad \text{(I.8)}$$

f est la fonction quelconque et x, coordonnée du point considéré.

En ce point x, f est une constante, indépendante du temps pour

$$x = x_0 + vt. \qquad \text{(I.9)}$$

On peut se convaincre que la relation suivante,

$$S = f\left(t + \frac{x}{v}\right) \qquad \text{(I.10)}$$

se propage dans le sens contraire des x et à $t = 0$

$$S = f(+\frac{x}{v}) \, , \qquad \text{(I.11)}$$

On obtient :

$$S = f(\pm\frac{x}{v}), \qquad \text{(I.12)}$$

La fonction S désigne les repartions des points dans un conducteur ou du champ électrique dans l'espace. S satisfait à une équation différentielle simple. En comparant les deux dérivées secondes de S par rapport à x et au temps t, on a l'équation :

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \qquad \text{(Equation de l'onde en une dimension).} \qquad \text{(I.13)}$$

Si l'onde se propage dans l'espace (à 3 dimensions), on a :

$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = v^2(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2})$ (Equation de l'onde en trois dimensions). (I.14)

Toute chose se propageant d'une manière ondulatoire, satisfait à l'équation d'onde [13].

b- Équations de Maxwell

Comme toutes ondes électromagnétiques, les ondes radio sont gouvernées par les équations de Maxwell :

- $divD = \rho_{libre}$ (I.15)
- $divB = 0$ (I.16)
- $rotE = -\frac{\partial B}{\partial t}$ (I.17)
- $rotH = j_{libre} + \frac{\partial D}{\partial t}$ (I.18)
- $divE = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ (I.19)
- $rotB = \mu_0 \vec{j}$ (I.20)

Où D est le déplacement électrique, B est l'induction magnétique, E est le champ électrique, H est le champ magnétique, ρ_{libre} est la densité de charges libres et j_{libre} est la densité de courant libre. [8, 15, 16]

I.2.3. Polarisation des ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence, sa direction de propagation et sa direction de polarisation. Cette polarisation correspond à la direction ou orientation de vibration de son champ électrique E [16, 18]. S'il est vertical, la polarisation est verticale. Un dipôle dont le conducteur est horizontal rayonne une onde polarisée horizontalement. Lorsque le champ E varie toujours dans le même plan (**Fig. I.4),** la polarisation est linéaire. Certaines antennes ont une polarisation circulaire comme le montre **(Fig.I.6),** cas particulier de la polarisation elliptique **(Fig. I.5)**.

Une onde non polarisée, ou naturelle, est une superposition de plusieurs ondes dont les champs électriques sont orientés aléatoirement dans toutes les directions contenues dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de telle sorte que leurs somme est nul. [5, 8, 19,20]

On distingue :

• polarisation linéaire : le champ électrique vibre toujours dans la même direction ;

• polarisation elliptique : le champ électrique tourne autour de son axe et change d'amplitude pour former une ellipse ;

• polarisation circulaire : le champ électrique tourne autour de son axe en formant un cercle.

Dans le plan d'onde donné par $z = 0$, le champ électrique s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{E} = E_{ox}\cos(\omega t)\vec{u}_x + E_{oy}\cos(\omega t - \psi)\vec{u}_y \qquad \text{(I.21)}$$

Diverse cas deviennent possibles en fonction de la valeur $de\ \psi$:

1^{er} cas: $\psi = 0$

On a:

$$\overrightarrow{E} = E_{ox}\cos(\omega t)\vec{u}_x + E_{oy}\cos(\omega t)\vec{u}_y \qquad \text{(I.22)}$$

A chaque instant, $\frac{E_x}{E_{ox}} = \frac{E_y}{E_{oy}}$ (I.21), ce qui signifie que le champ garde une direction fixe. Dans ce cas, l'onde a une polarisation rectiligne.

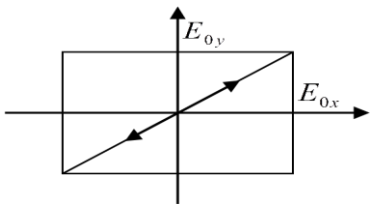


Fig. I.4.Polarisation rectiligne [8]

2^{eme} cas: $\psi = \pi$

On a:

$$\overrightarrow{E} = E_{ox}\cos(\omega t)\vec{u}_x - E_{oy}\cos(\omega t)\vec{u}_y \qquad \text{(I.23)}$$

A chaque instant, $\frac{E_x}{E_{ox}} = -\frac{E_y}{E_{oy}}$ (I.23), ce qui signifie que le champ garde une direction fixe. On a aussi une polarisation rectiligne.

3^{eme} *cas*: ψ *est quelconque*

$$\overrightarrow{E} = E_{ox}\cos(\omega t)\vec{u}_x + E_{oy}[\cos(\omega t)\cos\psi + \sin\omega t\sin(\psi)]\,\vec{u}_y \quad \text{(I.24)}$$

Soit :

$$\sin(\omega t)\sin\psi = \frac{E_y}{E_{oy}} - \cos\psi\frac{E_x}{E_{ox}} \quad \text{(I.25)}$$

et $$\cos\omega t\sin\psi = \sin\psi\frac{E_x}{E_{ox}} \quad \text{(I.26)}$$

En portant chacun des membres au carré et en sommant, on obtient :

$$(\frac{E_x}{E_{ox}})^2 + (\frac{E_y}{E_{oy}})^2 - 2\cos\psi\frac{E_x}{E_{ox}}\frac{E_y}{E_{oy}} = (\sin\psi)^2 \quad \text{(I.27)}$$

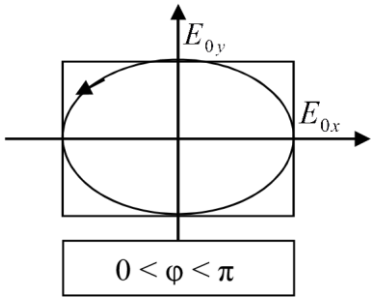
Cette équation est l'équation d'une ellipse. On a l'extrémité du champ électrique $\vec{E}$ décrit une ellipse. La polarisation est elliptique. [19]

Suivant les valeurs de ψ, cette ellipse peut être parcourue dans un sens ou dans l'autre.

Pour déterminer ce sens, plaçons nous a $t = 0$ toujours dans le même plan d'onde et en faisant évaluer le temps un peu en avant. Ceci permet de déterminer le sens de parcours selon la valeur de ψ

Si $0 < \psi < \pi$, l'ellipse est parcourue dans le sens trigonométrique, la polarisation est elliptique à gauche.

Si $\pi < \psi < 2\pi$, l'ellipse est parcourue dans le sens des aiguilles d'une montre, la polarisation est elliptique à droite.



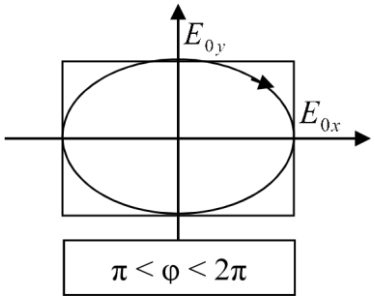


Fig. I.5. Polarisation elliptique [8]

$$\mathbf{4}^{eme}cas: \boldsymbol{\psi} = \frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{2}}\ \boldsymbol{ou}\ \boldsymbol{\psi} = \frac{\mathbf{3}\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{2}}\ \mathbf{et}\ \boldsymbol{que}\ \ \boldsymbol{E_{ox}} = \boldsymbol{E_{oy}}$$

On a: $E_x^2 + E_y^2 = E_{ox}^2$ (I.28)

L'extrémité de $\vec{E}$ décrit un cercle de rayon E_{ox}, la polarisation est circulaire à gauche pour $\psi = \frac{\pi}{2}$ et circulaire à droite pour $\psi = \frac{3\pi}{2}$ [8, 17, 20]

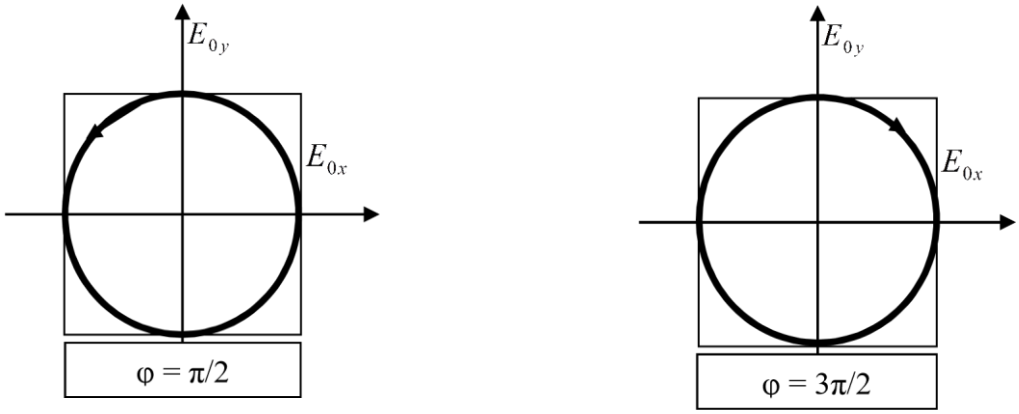


Fig. I.6. Polarisation circulaire [8]

I.2.4. Impédance intrinsèque

Le rapport entre l'amplitude des champs magnétiques et électriques est constant et égal à l'impédance intrinsèque du milieu de propagation :

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad \text{(I.29)}$$

avec Z, impédance intrinsèque du milieu de propagation en Ω, E amplitude du champ électrique en V/m, H amplitude du champ magnétique en T, μ perméabilité magnétique du milieu et ε permittivité diélectrique du milieu.

L'impédance intrinsèque de vide Z_0, est un paramètre important dans la propagation des ondes.

I.2.5. Vitesse de propagation des ondes

La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu de perméabilité μ et

de permittivité ϵ est donnée par la formule :

$$V = \sqrt{\frac{1}{\mu\varepsilon}}\, m/s \qquad \text{(I.30)}$$

En remplaçant μ et ε par la perméabilité du vide $\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}$ et et la permittivité $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$de vide on peut calculer c, la vitesse de propagation des ondes qui est aussi célérité de la lumière dans le vide.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3.10^8 m/s \qquad [21] \qquad \text{(I.31)}$$

I.3. Phénomènes de propagation

La propagation des ondes est un phénomène physique dont découlent l'évolution et la progression d'une onde au sein d'un milieu dans l'espace et le temps.

Les phénomènes de propagations utilisent le canal hertzien comme support physique des ondes Hertziennes. Pendant la propagation, l'onde transmise traverse différents types de canaux qui affectent l'onde émise. [8, 22, 23, 24, 25]

Plusieurs phénomènes se produisent lors de la propagation d'une onde :

a. Diffusion : Le phénomène de diffusion se produit quand une onde rencontre un obstacle irrégulier ou rugueux de petites dimensions (couches ionisées, surface du sol dans les régions vallonnées, surface des obstacles comme falaises, forêts, constructions, etc.). Comme en optique, la diffusion dépend du rapport entre la longueur d'onde et les dimensions des obstacles ou des irrégularités à la surface des obstacles réfléchissants. [26, 27, 28, 29, 30]

En se référant sur (**Fig.7)**, on distingue les d**iffuseurs locaux qui** occasionnent un étalement angulaire ou temporel des échos faible et les d**iffuseurs lointains** qui donnent lieu à des trajets multiples caractérisés par un fort étalement temporel). [5, 19, 31, 32]

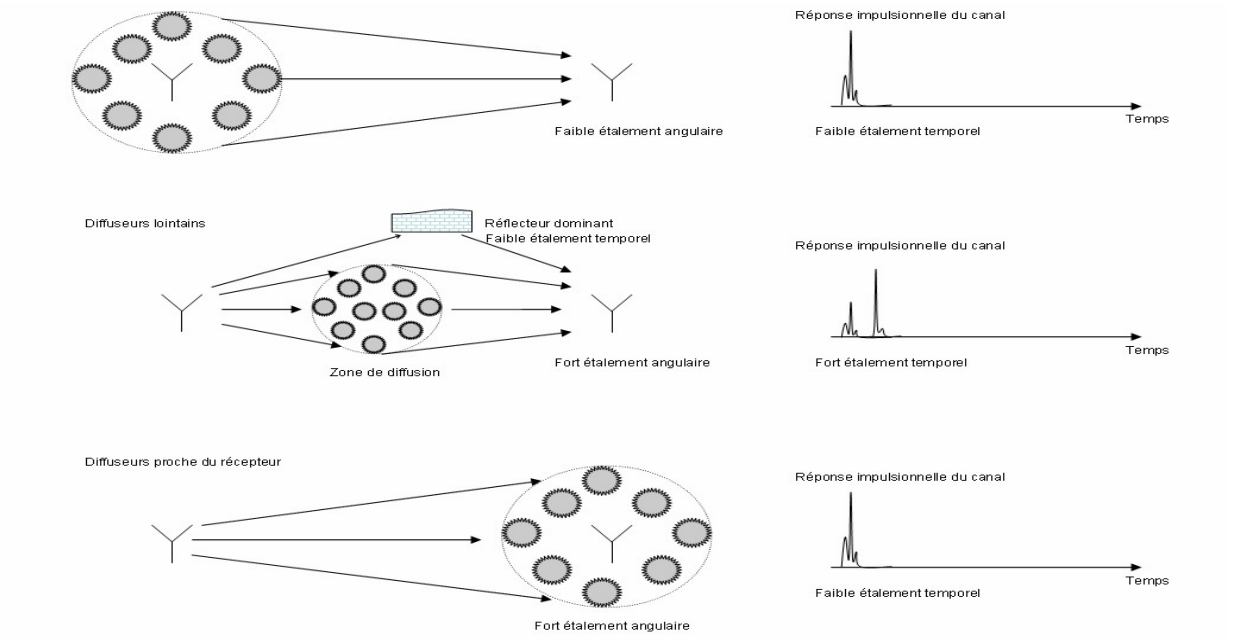


Fig. 7. Influence de localisation spatiale des diffuseurs sur la réponse du canal [5]

La figure précédente **(Fig.7)**, montre que les diffuseurs qui environnent un dipôle émetteur engendrent des faibles fluctuations de puissance dans le canal et ceux qui environnent un dipôle récepteur, occasionnent des forts retards avec de faible fluctuations ou étalements temporels également. Cependant les diffuseurs qui sont loin de ces deux dipôles entrainent des forts étalements temporels, ce qui dégrade la qualité de l'information à la réception suite à la fluctuation de la puissance reçue en fonction de la distance.

b. Réflexion : On parle de réflexion lorsque l'onde se réfléchit sur une surface suivant les lois de réflexion de Descartes, cas d'un rayon lumineux sur un miroir.

c. Réfraction : Consiste en une déviation d'un rayon lumineux pendant qu'il traverse la surface de séparation de deux milieux d'indices de réfraction différents. Une onde radio peut subir un changement de direction dépendant à la fois de sa fréquence et de la variation de l'indice de réfraction. Quand les ondes électromagnétiques se propagent d'un milieu à l'autre, donc du milieu plus réfringent au moins réfringent ou inversement elles subissent un changement de direction qui engendre les pertes exprimées suivant l'équation. [33]

$$\text{Perte de refraction(dB)} = -20\log\left(\frac{7{,}4586}{10^6 * \sqrt{\frac{f}{\sigma}}}\right) \qquad \text{(I.32)}$$

σ désigne la conductivité (Ohm), f désigne la fréquence (Hz). [5, 32]

d. Diffraction : Lorsqu'une onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde, celle-ci pourrait être arrêtée par cet obstacle (colline, d'une montagne, etc.). Cependant, l'onde cherchera à contourner l'obstacle et continuer à se propager derrière celui-ci. Ce contournement de divers obstacles par les ondes électromagnétiques s'appelle **diffraction** des ondes. Elle joue un rôle très important pour établir une liaison radioélectrique stable entre les points éloignés et dépend de la longueur d'onde. Elle se manifeste d'autant plus fortement que la longueur d'onde est plus grande. Seules les ondes longues jouissent les propriétés de contourner la surface terrestre. [1, 32]

e. **Interférence de deux ondes** : Dans ce phénomène, les temps de parcours des deux ondes sont différents et les deux signaux reçus sont déphasés. Plusieurs cas peuvent alors se présenter :

1. déphasage égal à un multiple de la période, les signaux sont en phase et se renforcent mutuellement (constructives). Leurs amplitudes s'ajoutent.

2. déphasage égal à un multiple impair d'une demi-période, les signaux sont en opposition de phase et l'amplitude devient plus faible ou nulle (destructives). [32]

La propagation des ondes s'effectue de deux façons :

• Propagation en espace libre (l'air) appelée propagation rayonnée (autour de la Terre) ;

• Propagation dans des lignes ou conducteurs qu'appelle aussi propagation dans un câble coaxial ou guide d'onde. [8]

I.3.1. Propagation en espace libre

Les ondes électriques libres se produisent dans le cas où le dipôle émetteur est entièrement placé dans l'air (**Fig. I.8)** et à une distance/hauteur suffisamment grande de tous les objets environnants [34]. Ces conditions sont réalisées lors de l'émission des ondes courtes (quelques mètres et moins), lorsque les dimensions du dipôle sont petites et le dipôle est élevé à une grande hauteur au-dessus de la surface de sol.

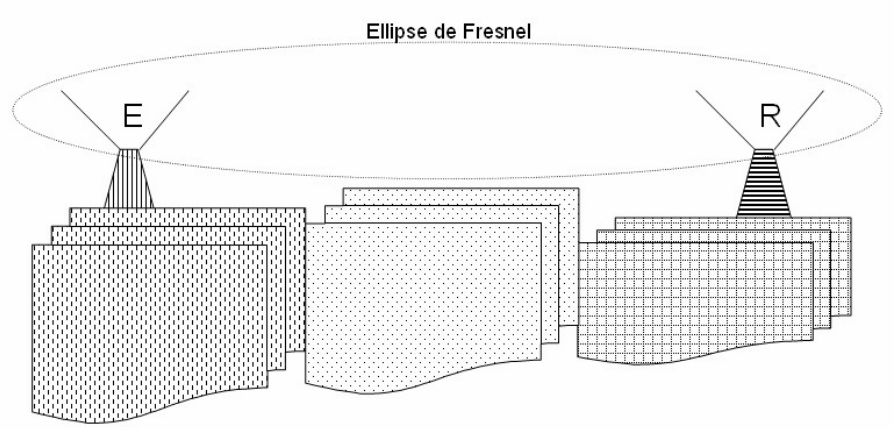


Fig. I.8. Modélisation de l'espace libre [5]

Pour l'émission en ondes longues (quelques centaines et même milliers des mètres) on utilise toujours des antennes dont l'une des extrémités est mise à la terre. La mise à la terre de l'antenne consiste à modifier le caractère de l'onde électromagnétique (a pour effet de doubler sa longueur d'onde) c'est-à-dire que l'image du champ d'onde émise par une antenne mise à la terre représente la moitié supérieure de celle de l'antenne mis à l'air. Dans ce cas les lignes de force du champ électrique se ferment d'un côté dans l'air et de l'autre à travers la terre. De telles ondes peuvent être appelées ondes semi-libres.

La puissance émise est alors régie par l'équation générale de la télécommunication suivante:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d^2}\right)^2 \text{ (Watt)} \qquad \text{(I.33)}$$

P_t est la puissance émise par l'émetteur de gain G_t, P_r est la puissance reçue par le récepteur de gain G_r, d est la distance (portée) en mètres séparant les deux antennes [30, 34] et λ est la longueur d'onde émise ou reçue.

Cette valeur de P_r ne prend pas en compte la dépolarisation, la désadaptation et les variations spectrales de gain des antennes. [35]

On en déduit l'affaiblissement de liaison.

$$A_L = \frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d^2}\right)^2 \qquad \text{(I.34)}$$

Les pertes A_L sont inversement proportionnelles à d^2.

Pour les antennes isotropes ou omnidirectionnelles, on a [36] :

$$G_t = G_r = 1 \qquad \text{(I.35)}$$

Les ondes électromagnétiques se propagent dans tous les milieux qu'ils soient gazeux, liquides ou solides. [37, 38, 39]. Elles sont transmises d'un point à l'autre via un ou plusieurs modes de propagations parmi lesquelles, les propagations autour de la Terre et ionosphérique ont été beaucoup considérées en radio.

I.3.2.La propagation hors espace libre

Dans les situations les plus courantes de propagations, les systèmes de radiocommunication sont loin d'être en espace libre (**Fig.7).** Les obstacles naturels : bâtiment, sol ou collines et montagnes, arbres, de différentes formes géométriques et de diverse caractéristique physique perturbent la propagation. Ces perturbations se traduisent par des fluctuations de la puissance du signal reçu en fonction de la distance. [34]

La propagation en bande de hautes fréquences HF et le fait que l'antenne de transmission soit en ligne de vue avec celle de réception sont solution aux perturbations ou fluctuations de puissance. Cela permettra que les ondes aillent très loin [20].

I.4.CAnal de propagation radio mobile

En communications sans fil, le canal de propagation constitue le milieu séparant l'émetteur et le récepteur y compris le support physique des ondes électromagnétiques, associé aux antennes d'émission et de réception.

En général, les antennes et certains organes/interfaces de la chaîne sont englobés dans un modèle de canal de transmission dont les caractéristiques dépendent de la nature du milieu où sont placés l'émetteur et le récepteur, de la distance entre ces derniers, des perturbations issues du model de canal et des interférences provenant d'autres utilisateurs du même canal ou de brouilleurs. Ces caractéristiques dégradent la qualité du signal transmis et doivent par conséquent être prises en compte lors de l'élaboration d'une stratégie de transmission. [30]

Si les télécoms sans fil présentent un grand débit, il est nécessaire de fournir des modèles de canal de propagation en fonction de largeur de bandes utilisées, de la gamme de fréquence et des conditions de l'environnement. Cette modélisation consiste à dimensionner au mieux les interfaces radio en termes de qualité de service, d'optimiser les réseaux lors de leur déploiement (détermination des zones de couverture, choix des sites, définition des puissances, gains d'antenne, etc.) et de déterminer les brouillages éventuels.

I.4.1. Caractérisation du canal de propagation

a. La propagation par trajets multiples

Les obstacles dans l'environnement de propagation font naitre différentes répliques de signal émis [40]. Ces obstacles, engendrent une multitude d'ondes ou répliques retardées, atténuées et déphasées qui sont soumises aux distorsions induites par les trajets multiples au niveau du récepteur. Ce qui évite l'interruption de la liaison entre l'émetteur et le récepteur.

A la réception, la somme de ces répliques peut être constructive ou destructive. C'est la source du phénomène d'évanouissement.

Le signal reçu représente la contribution de tous les trajets multiples et données en notations complexes suivantes :

$$y(t) = u(t)e^{[j(2\pi f_c t + \varphi(t))]} \quad \text{(I.36)}$$

Ou en notation équivalente en bande de base.

$$y(t) = u(t)e^{[j\varphi(t)]} \quad \text{(I.37)}$$

$u(t)$ est l'amplitude de $y(t)$, aussi appelé enveloppe du signal et f_c la fréquence du signal et $\varphi(t)$ est la phase du signal.

A la réception, ces rayons n'y parviennent pas au même instant à cause de ces trajets différents. Les signaux auraient subi des échelles de variation en fonction de la distance c.à.d. en fonction de l'éloignement entre récepteur et les obstacles. Ce sont des variations lentes ou petite échelle et variations rapides ou à grande échelle. Les différents temps de propagation qu'elles ont mis, engendrent des distorsions du canal de propagation qualifiés « d'étalement en temps » ou « d'étalement des retard ». [30, 32, 40, 50]

Lorsque le récepteur se déplace, le signal subit des distorsions supplémentaires liées à la vitesse du mobile. Ces variations du canal de propagation en fonction du temps se traduisent dans le domaine fréquentiel par la variation de la fréquence reçue en fonction du temps encore appelée « étalement Doppler » dans l'intervalle $[f_c - F_d, f_c + F_d]$ ou $f_c$est la fréquence du signal transmis et F_d est la fréquence doppler. [4, 19, 21]

Pour estimer la puissance reçue en un point, une modélisation des différents mécanismes de propagation et de l'environnement est mise en œuvre.

Cette puissance dépend entre autres des trajets multiples résultant de l'interaction du signal émis avec les nombreux obstacles présents dans l'environnement et de l'affaiblissement du trajet direct PL (Path Loss).

Deux approches de modélisation sont généralement retenues : l'approche théorique et l'approche statistique. Elles conduisent respectivement à des modèles déterministes c'est-à-dire empiriques et semi-empiriques.

Les modèles statistiques

$P(\rho) = -\frac{\rho}{\sigma^2} e^{\left(\frac{-\rho}{2\sigma^2}\right)^2},\ \rho \geq 0,\ Modele\ de\ Rayleigh$ et σ^2 désigne la variance (I.38)

$\rho = \rho(t) = \| r(t) \| = amplitude\ du\ spectre$ (I.39)

Les modèles déterministes s'appuient sur les lois de la physique. Leurs modèles empiriques sont basés sur l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales en fonction de différents paramètres tels que la fréquence, la distance, la hauteur des antennes. Les modèles semi-empiriques déterminent différentes interactions électromagnétiques (réflexion, diffraction, diffusion) entre chaque rayon et les diffuseurs présents dans l'environnement, par les techniques du lancer ou déterminent les images qui consiste à commencer la recherche à partir du récepteur c'est à dire déterminent les rayons pouvant se propager de l'émetteur vers le récepteur par les techniques du tracé de rayons. [30, 35]

b. Phénomènes à grandes et à petites échelles ou atténuations du canal

Les évanouissements à grande échelle définissent les fluctuations ou pertes de puissance due aux obstacles, mesurées sur un déplacement grand ou sur un intervalle de temps suffisamment grand. Les fluctuations à petite échelle sont observées sur un intervalle de temps ou un déplacement spatial suffisamment petit, cas des diffuseurs lointains **(Fig.7).**

Les deux phénomènes sont à l'origine des variations en distance. [34] Ces phénomènes sont dus aux obstacles fixes ou mobiles, qui produisent des répliques du signal transmis. Ces répliques subissent chacun également des interactions électromagnétiques (réflexion, diffraction, diffusion, etc.) qui se traduisent par la perte d'énergie (**Fig.I.9)** en cours de chemin. [32, 41, 42]

Les pertes moyennes de puissance des canaux sont exprimées en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, Gain des antennes, la fréquence de l'onde et le type de canal de propagation.

$$A = 32.44 + 20\log_{10}(f) - 10\log_{10}(G_t G_r) + \alpha\ \log_{10}(d) \qquad \text{(I.40)}$$

A représente les pertes moyenne, d désigne la distance entre deux antennes, α désigne le type de milieu, f désigne la fréquence(MHz) et G_r, G_t gain de réception et transmission respectivement.

Tableau II.1. Valeur de la variable α en fonction du type d'environnement [5]

Types d'environnement	**Les valeurs de α**
Espace Libre	2
Urbain	2,7 à 3,5
Urbain dense	3 à 5
Intérieur de bâtiment de type bureau avec trajet direct	1,6 à 1,8
Intérieur de bâtiment de type bureau sans trajet direct	4 à 6
Intérieur de bâtiment de type hall sans trajet direct	2 à 3

Les valeurs de α sont inférieures à 2 donc comprise entre 1 et 2 dans le milieu interne de bâtiment de type bureau avec trajet direct seulement. Ailleurs, dans les autres milieux, elles varient de 2 à 6.

Comme on peut le déduire de cette relation, les pertes moyennes de puissance ne sont plus proportionnelles à d^2 comme dans le cas de l'espace libre, mais à d^{α} où α est une variable dépendante de l'environnement. [1, 32]

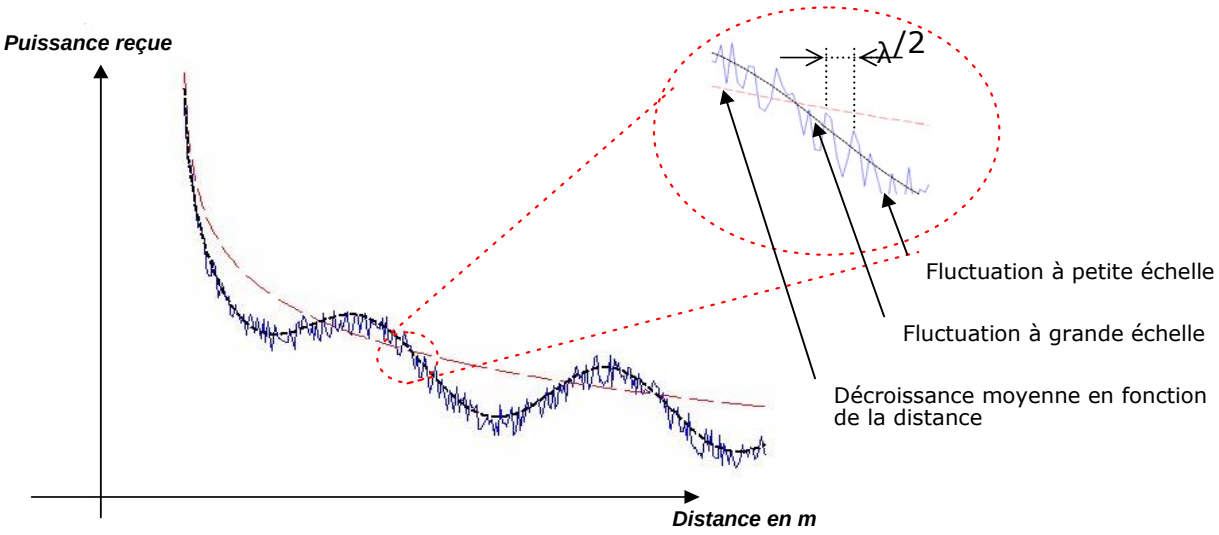


Fig. I.9. Puissance reçue en fonction de la distance [5]

c. Modélisation de canal et bruits radioélectriques

La caractérisation d'un canal peut se faire en étudiant sa réponse impulsionnelle [35, 43, 44]. En considérant l'émetteur et ou le récepteur en mouvement, l'expression de la réponse impulsionnelle h s'exprime comme suit:

$$h(\tau,t) = \sum_{p=0}^{P-1} \beta_p(t)\, e^{i(2\pi\nu_p t+\theta_p(t))}\delta(\tau-\tau_p) \qquad \text{(I.41)}$$

Cette représentation de la réponse permet de lier les signaux reçus r et émis s, selon la relation suivante où n désigne le terme de bruit additif. [32]

$$r(t) = (h * s)(t) + n(t) \qquad \text{(I.42)}$$

$$r(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \beta_p(t)\, e^{i\left(2\pi\nu_p t+\theta_p(t)\right)}\delta\left(\tau-\tau_p\right) * s\left(\tau-\tau_p\right)d\tau + n(t) \qquad \text{(I.43)}$$

Où p désigne le nombre de trajets discernables combinés par le récepteur et ce nombre n'est pas obligatoirement égal au nombre des trajets se trouvant dans le canal.

Chaque trajet peut être modélisé par une amplitude β_p et un déphasage θ_p associés au retard τ_p, le terme ν_p, désigne la fréquence de décalage Doppler, i désigne un complexe associe au retard τ_p, δ désigne l'impulsion de Dirac. τ_p désigne les retards qui dépendent du temps t.

Cette réponse impulsionnelle h du canal dans l'espace-temps – retard, désigne la fonction d'étalement des retards. Le dernier terme $n(t)$ represente les bruits radio electriques.

Un signal est dit bruit s'il ne transporte pas l'information utile et perturbe le canal. Ces bruit sont dus au milieu de propagation ainsi qu'aux dispositifs électroniques de l'émetteur-récepteur. Les informations inutiles sont appelées bruit. On distingue deux types de bruit :

1. les bruits naturels ou extra-terrestres : bruit et parasites atmosphériques, rayonnement divers captés par l'antenne, interférence éventuelles entre les utilisateurs du milieu de transmission.

2. les bruits internes (bruits blancs) dû aux mouvements des électrons dans les composants électroniques du récepteur.

d. L'effet Doppler

En environnement radio-mobile, l'effet Doppler est un phénomène lié au mouvement relatif à l'émetteur ou au récepteur. Si leur mouvement est effectuée à une vitesse radiale constante, le signal reçu est soumis à un décalage fréquentiel (proportionnel à cette vitesse et à la fréquence porteuse) appelé effet Doppler.

Cette dispersion ou décalage fréquentielle est due à la variation de la réponse impulsionnelle (RI) du canal en fonction du temps et se traduit par une augmentation de la bande de fréquence occupée par le signal (B_c). [30]

De cet effet, le canal est en plus caractérisé par espace-fréquence temps, retard Doppler et fréquence Doppler.

$h(f,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau,t)e^{-2i\pi ft}\,dt$ (espace-fréquence temps) (I.44)

$D(\tau.\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\,(\tau,t)e^{-2i\pi\nu_p\tau}d\tau$ (Retard Doppler) (I.45)

$F(f,\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} h\,(\tau,t)e^{-2i\pi(\nu_p\tau+ft)}d\tau dt$ (Fréquence Doppler) (I.46)

Ceci permet lors de la conception d'un système de transmission, de trouver un compromis entre le temps de cohérence du canal ($T_c = \frac{1}{B_c}$) durant lequel les variations de la Réponse Impulsionnelle restent négligeables et la période d'un symbole (T_s) tel que $T_s << T_c$ [30]

I.4.2.Dispersions dans les canaux

A la réception, les répliques s'interfèrent de manière constructive ou destructive. Ces interférences sont créées par une dispersion temporelle du signal liée au retard temporel des échos. On observe également des variations de l'enveloppe du signal reçu, liée à la modulation de fréquence due au déplacement relatif de l'émetteur par rapport au récepteur (effet Doppler). Ces phénomènes limitent les performances en termes de débit dans les modulations. Pour compenser les effets du canal, des égaliseurs adaptatifs sont souvent mis en place à la réception.

La configuration spatiale du récepteur et de l'émetteur engendre des dispersions temporelles et fréquentielles. Ces dispersions définissent des paramètres à exploiter dans le canal pendant le dimensionnement d'un système de radiocommunication pour en déduire d'autres paramètres tel que la bande et le temps de cohérence. [24, 30, 31]

a. Dispersions temporelles

Les dispersions temporelles sont des dispersions des retards et de la bande de cohérence qui sont inversement proportionnelles. Pour des dispersions élevées des retards, nous aurons des bandes de cohérences faibles. [19]

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau} \qquad \text{(I.47)}$$

Où σ_τ désigne la dispersion moyenne de retards pour $\tau \in [0, \tau_{max}]$

b. Dispersions fréquentielles

Elles sont liées au mouvement d'un émetteur ou d'un récepteur provoquant un décalage fréquentiel du spectre de signaux émis appelés effet Doppler. Cet effet dépend de la vitesse relative au déplacement. [19, 45]

$$f_r = f_c + f_d \qquad \text{(I.48)}$$

Où $f_r, f_c \; et \; f_d$ désignent respectivement la fréquence reçue, fréquence émise et le décalage Doppler.

$$f_d = \frac{v_p f_c}{C} \cos\theta \qquad \text{(I.49)}$$

Où c désigne la célérité.

Selon cette expression, la bande fréquentielle sur laquelle évolue la fréquence de décalage Doppler appelée étalement Doppler ou bande Doppler est égale à :

$$B_d = 2f_{dmax} \qquad \text{(I.50)}$$

$$f_{dmax} = \frac{v_p f_c}{C} \text{ (Fréquence Doppler max)} \qquad \text{(I.51)}$$

Le spectre Doppler représente la répartition de la puissance autour de la fréquence porteuse. Lorsque les signaux sont reçus uniformément sur toutes les directions et que l'antenne de réception est omnidirectionnelle, le spectre Doppler obtenu à une forme de cercle.

Le temps de cohérence t_c du canal et f_{dmax} évoluent de manière inversement proportionnelle. Le temps de cohérence du canal représente l'évolution temporelle de celui-ci, il est lié aux dispersions fréquentielles.

$$t_c = \frac{9}{16\pi \boldsymbol{f_{dmax}}} \text{ , } t_c \text{ en fonction de } f_{dmax} \qquad \text{(I .52)}$$

Ces notions de bande et de temps de cohérence permettent de dégager certaines contraintes de développement pour les systèmes de radiocommunications vis-à-vis d'un canal de propagation donné.

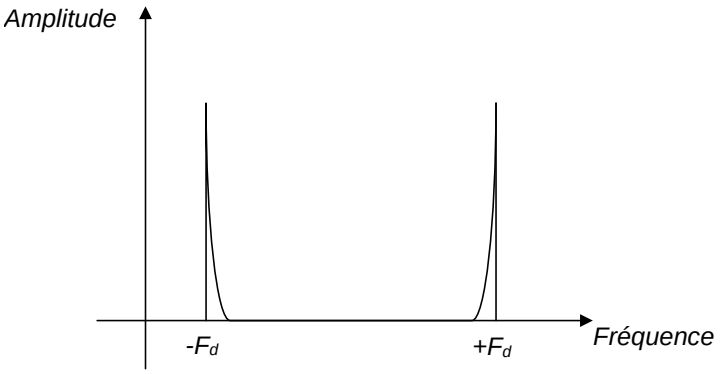


Fig. I.10. Spectre Doppler [5]

I.4.3.La sélectivité des canaux

La sélectivité des canaux se définie par les valeurs des fréquences de la bande. Les multi-trajets et leurs déplacements sont la source d'une sélectivité fréquentielle et temporelle

$$\frac{t_s}{t_c} = \frac{B_s}{B_c} \qquad \text{(I.53)}$$

Où t_s est la durée de signal transmis et B_s sa bande.

I.4.4. Diversité de canal

La diversité est une notion très utilisée dans les systèmes de communication pour combattre les évanouissements inhérents au canal radio. En exploitant la diversité, une information peut être transmise sur diverses liaisons ayant des évanouissements indépendants. Dans ce contexte, il est probable qu'une des liaisons subisse de plus faibles atténuations, permettant ainsi d'améliorer la robustesse de la liaison. La diversité permet également d'augmenter la capacité et la couverture des systèmes de transmission radio. Les trois formes de diversité sont la diversité temporelle, la diversité fréquentielle et la diversité spatiale.

Elle se définie par la présence en réception de plusieurs répliques indépendant d'une même information. [30]

a. La diversité temporelle

Le principe de la diversité temporelle consiste à transmettre plusieurs répliques du signal dans des intervalles temporels séparés d'au moins par le temps de cohérence t_c du canal (temps pendant lequel le canal est considéré comme étant stationnaire).

$$D_t = \frac{t_s}{t_c}, \qquad \text{(I.54)}$$

t_s est la durée de signaux

$$D_t = \frac{B_s}{B_c} \qquad \text{(I.55)}$$

Recevoir plusieurs répliques décohérés du même signal apporte de la diversité, ce qui permet non seulement de contourner les obstacles physiques du canal (évanouissement) mais aussi de garantir une bonne transmission de l'information.

b. La diversité fréquentielle

On introduit alors la diversité fréquentielle pour combattre les évanouissements sélectifs en fréquence du canal. Le principe consiste à émettre le même signal sur plusieurs fréquences porteuses, dont l'écartement fréquentiel est au moins égal à la bande de cohérence du canal (bande passante B_c pour laquelle le canal est considéré comme stationnaire).

c. La diversité spatiale

La diversité spatiale ou d'antenne consiste à émettre ou recevoir l'information sur plusieurs antennes. La tendance actuelle dans les réseaux sans-fil est d'associer plusieurs antennes à la fois à l'émission et à la réception, formant ainsi des systèmes multi-antennes plus connus sous le nom de systèmes MIMO ou SIMO. Chaque antenne réceptrice reçoit la somme des signaux émis sur les différentes antennes émettrices. L'exploitation efficace de la diversité spatiale passe par une disposition optimale des antennes dans l'espace permettant de garantir des évanouissements indépendants sur les différentes trajectoires des signaux émis.

La distance de cohérence D_c, qui correspond à la séparation minimale entre deux antennes en-dessous de laquelle les signaux émis et/ou reçus sont fortement corrélés.

La richesse de la diversité spatiale dépend de cette distance, car le système MIMO n'apportera aucun avantage si les antennes sont disposées de manière à fournir le même écho sur chaque antenne réceptrice (forte corrélation entre les trajectoires).

Des mesures empiriques ont montré que cette distance dépend de la longueur d'onde λ. Des distances de cohérence minimale de 10λ à l'émission et 0.4λ à la réception suffissent à décorréler suffisamment les trajectoires.

On diminue ainsi la probabilité qu'un évanouissement apparaisse simultanément ou sur la même bande de fréquence pour les différentes trajectoires.

La diversité spatiale est aussi une technique très efficace pour augmenter la capacité des systèmes de communication, c'est-à-dire la quantité maximale d'informations qui peut être transmise sur un canal puis reçue avec une probabilité d'erreur négligeable.

La diversité spatiale consiste à transmettre simultanément ou non, des informations sur plusieurs antennes qui doivent être espacées d'au moins la distance minimale (assurant l'indépendance)/empêchant des évanouissements qui est dite « distance de cohérence » [61].

Alors que la cohérence fréquentielle est engendrée par les multi-trajets à la réception arrivant à des instants différents, la cohérence spatiale à l'émission est engendrée par les multi-trajets partant en différentes directions spatiales. [46]

Profiter des diversités temporelles, fréquentielles et spatiales du canal revient à maximiser ces valeurs tout en garantissant une bonne efficacité spectrale. L'efficacité spectrale est une autre forme de caractérisation du canal. Elle est estimée en déterminant la capacité de ce dernier. [5]

I.4.5.Capacité du canal

C'est la vitesse maximale des bits à transmettre sur un support physique. Elle exprime le taux maximal de bit possible à transmettre tout en garantissant une faible perte de données. Elle permet de définir l'efficacité spectrale d'un canal. [47]

$C = \log (1+ \rho)$ bits/s/Hz (I.56)

$\rho = SNR$ en réception (rapport signal-bruit) [5, 8, 21]

La télécommunication ne concerne que l'information à transmettre et non pas son support matériel (papier, disque, bande magnétique, clé USB, mémoires..). Cette information peut prendre des formes diverses (images fixe ou mobile, musiques, textes, données,..).

Un des principaux problèmes à résoudre est garantir un degré élevé de fidélité. C'est-à-dire transparence malgré les inévitables imperfections et perturbations que présentent les moyens disponibles.

L'usager qui confie son information aux systèmes de télécom, souhaite qu'elle soit restituée sans pertes ni altérations. Il attend des télécoms un sévices permanent, disponible en toute circonstance. Assurer cette fiabilité en dépit des pannes partielles, imprévisibles et inévitables, est aussi une préoccupation primordiale, alors que les communications spatiales est également un problème de transmission autre branche important des télécommunications.

L'art de l'ingénieur consiste à trouver la solution la plus économique à un problème de communication, dans un éternel compromis entre coût et qualité. [21, 32]

I. 5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les ondes libres ou stationaires selon le milieu. Ensuite nous avons également présentés les phénomènes spécifiques et nécessaires liés à la propagation (la diffusion, la réflexion, diffraction, réfraction, les multi-trajets, l'effet Doppler, de bruits ou distorsions et dispersions) qui permettent de caractériser le canal de transmission radio-mobile dont il faut considérer lors de la mise en place d'un réseau sans fil ou d'une chaîne de communication, en déduisant ces phénomènes les paramètres à exploiter ou à prendre en compte. Pour surmonter les inconvénients inhérents au canal radio-mobile, on a constaté qu'on se sert des techniques qui tirent parti de la diversité temporelle, fréquentielle ou spatiale du canal de transmission.

CHAPITRE II. MODULATION DES ONDES RADIO

II.1. Introduction

La modulation est une opération qui transpose/transforme un signal de sa forme originale en un autre signal ou forme adaptée au modèle choisi de canal de transmission sans modifier sensiblement l'information qu'il porte, dans le but d'assurer la qualité suffisante de transmission d'une information analogique (voix, musique, image) dans les limites de canal et pour également permettre le multiplexage. [46, 48, 49]

Ce but d'assurer la qualité suffisante de transmission d'une information ne se réalisent pas toujours en une étape, ni avec le même procédé de modulation. On aura recours à des modulations multiples et procédés mixtes. [22]

Une modulation est nécessaire dans les cas où, pour des motifs techniques ou économiques, une transmission en bande de base n'est pas possible. [15, 31, 32, 50]

II.2.Principe de la modulation

En transmission, on fait varier les oscillations du générateur en fréquence et en 'intensité conformément au signal à transmettre pour que les oscillations électriques puissent créer dans l'antenne un courant alternatif oscillant très rapidement à haute fréquence pouvant produire le rayonnement des ondes radioélectriques grâce à ce courant de déplacement suffisamment intenses [18].Transmettre la parole ou la musique dans l'antenne à l'aide d'un émetteur nécessite un courant variable et à haute fréquence, après une amplification convenable. Si on injecte directement dans l'antenne les courants de signal sans transposition, on n'émet dans l'espace pratiquement aucune puissance. [37, 38, 39, 49]

Pour éliminer ce problème en radiotechnique, on se sert d'un procédé qui consiste en ce que la transmission d'énergie est assurée par les oscillations à haute fréquence. Les oscillations à basse fréquence du signal ne sont utilisées que pour faire varier ou pour moduler les oscillations à haute fréquence. [4]

Par la modulation, un signal u(t), appelé signal primaire (signale modulant), est transposé en un signal secondaire modulé $P(t)$. L'émetteur transpose les signaux primaires en bande de base vers la bande dans laquelle il lui est autorisé de transmettre. [51]

Toute modulation travaille selon une convention qui lie des valeurs caractéristiques de P(t) aux valeurs instantanées de $u(t)$.

II.3. Types de modulation d'une onde radio

On distingue deux types de modulation : analogique et numérique qui portent toutes, sur l'amplitude (AM) qui est le plus fréquemment utilisée, sur la fréquence (FM) et sur la phase. Elles consistent à varier un paramètre (amplitude, fréquence, phase) sans modifier la nature de l'information analogique portée par $u(t)$ et $P(t)$ modulé.

Les modulations numériques opèrent une conversion analogique en numérique entre $u(t)$ et $P(t)$. Un signal RF analogique à basse fréquence, peut être modélisé par l'expression suivante :

$$u(t) = f(t) \qquad \text{(II.1)}$$

Où $f(t)$ est la fonction du signal modulant.

A la fréquence fixe, l'information $u(t)$ peut être introduite dans l'amplitude, dans la fréquence ou dans la phase ou dans les deux à la fois du signal porteur $P(t)$.

II.3.1. Modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude est la plus employée en télécommunication. Elle varie comme l'indique la sortie de (**Fig.II.1)** ou **(Fig. II.2)**, l'amplitude d'un signal de fréquence élevée $P(t)$ (le signal porteur ou la porteuse) en fonction d'un signal de plus basse fréquence $u(t)$ (signal modulant).

La porteuse $P(t) = A_p \cos(\omega_p t)$. (II.2)

Où A_p est l'amplitude de la porteuse et ω_p est sa pulsation

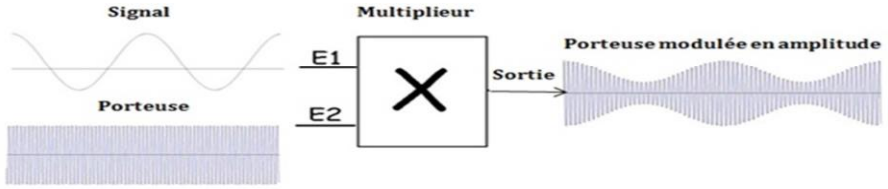


Fig. II.1.Modulation d'amplitude [8]

Le signal produit par la station émettrice, ses formes d'oscillations de courant dans l'antenne sont tels que :

$$P'(t) = A_p f(t) \cos(\omega_p t) \qquad \text{(II.3)}$$

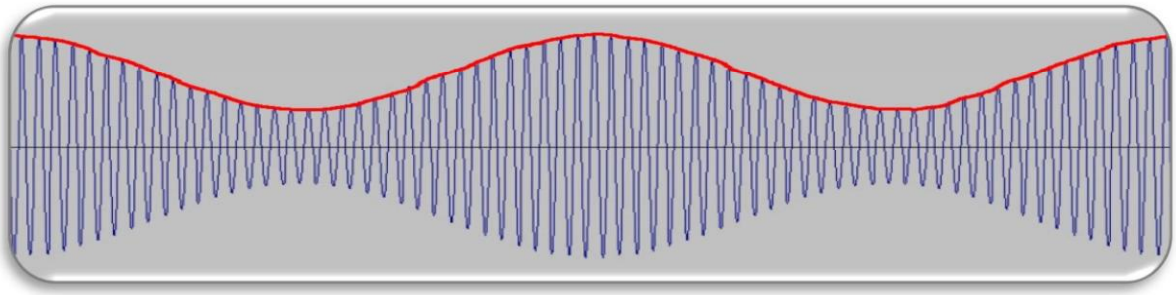


Fig. II.2.Signal modulé [8]

A la réception, la démodulation de ce signal demandera de reconstituer le signal porteur. Ici, on ajoute la porteuse P(t) au signal précèdent en vue d'éviter la reconstruction de la porteuse à la réception.

$$P'(t) = A_p \cos(\omega_p t) + A_p f(t) \cos(\omega_p t) \qquad \text{(II.4)}$$

En présence d'un signal (parole ou musique devant le microphone), ces oscillations sont transformées en oscillation complexe.

$$P'(t) = A_p[1 + f(t)]\cos(\omega_p \mathrm{t}) \qquad \text{(II.5)}$$

$f(t)$ est la fonction modulatrice dépendant du type de signal et tel que $\| f(t) \| < 1$

Dans ce cas, le courant dans le circuit émetteur varie suivant une loi harmonique et la fonction modulatrice est de la forme :

$$f(t) = \mathrm{k} \cos \Omega t \qquad \text{(II.6)}$$

Où k est l'amplitude du signal modulant et Ω est sa pulsation

Quant aux oscillations du courant dans l'antenne, elles se décrivent par la formule

$$P'(t) = A_p[1 + \mathrm{k} \cos \Omega \mathrm{t}\,]\cos(\omega_p \mathrm{t}) \qquad \text{(II.7)}$$

Comme $\Omega \ll \omega$, cette oscillation peut être considérées en première approximation, comme oscillation harmonique d'amplitude $I = A_p[1 + \mathrm{k}\ \cos(\Omega t)\ ]$ qui varie périodiquement dans le temps. Ses valeurs maximale et minimale sont :

$$I_{max} = A_p[\ 1 + k\ ] \quad et \quad I_{min} = A_p[\ 1 - k\ ] \tag{II.8}$$

La quantité k ou profondeur / taux de modulation est donne par :

$$k = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{II.9}$$

En utilisant les formules de Simpson connues, on s'assure que (II.7) donne

$$P'(t) = A_p \cos(\omega_p \mathrm{t}) + \frac{1}{2} A_p \mathrm{k}\ \cos(\omega_p - \Omega)t + \frac{1}{2} A_p \mathrm{k}\ \cos(\omega_p + \Omega)t \tag{II.10}$$

$$P'(t) = [A_p + \Delta A_p(t)] \cos(\ \omega_p \mathrm{t}) \tag{II.11}$$

Avec la variation constante qui dépend de l'amplitude

$$\Delta A_p(t) = \alpha f(t) = \alpha u(t) \tag{II.12}$$

$\alpha = \frac{\Delta A_p}{A_p}$ est un facteur constant qui dépend du modulateur et $[A_p + \Delta A_p(t)]$, constitue l'enveloppe du signal modulé.

Une oscillation modulée vaut la somme de trois oscillations harmoniques de pulsations $\omega_p; (\omega_p - \Omega)$ et $(\omega_p + \Omega)$.

La fréquence fondamentale ω_p de l'émetteur est désignée en radiotechnique sous le nom de fréquence porteuse alors que les fréquences supplémentaires $(\omega_p - \Omega);\ (\omega_p + \Omega)$, sont appelées respectivement fréquences latérales inférieure et supérieure résultant de modulation.

II.3.2. La démodulation par détection d'enveloppe du signal modulé

La modulation AM présente l'avantage de permettre une démodulation très simple par détection d'enveloppe du signal secondaire, puis filtrage.

Ce procède n'est applicable que si l'enveloppe $[A_p + \Delta A_p(t)]$ est toujours positive. C'est-à-dire que,

$$\Delta A_p(t) < A_p \tag{II.13}$$

C'est le cas d'un redressage à deux alternances. Dans $P'(t)$, si $A_p > \Delta A_p(t)$, l'enveloppe est toujours positive, $u'(t)$ peut s'écrire :

$$R(t) = u'(t) = \sqrt{P'^2}(t) = \| P'(t) \|, \quad \text{(II.14)}$$

$$R(t) = u'(t) = \sqrt{P'^2}(t) = \| P'(t) \| = [A_p + \Delta A_p(t)]\sqrt{(\cos(\omega_p \mathrm{t}))^2} \quad \text{(II.15)}$$

Où $R(t) = u'(t)$ est le signale démodulé

Le développement en série de$\sqrt{(\cos(\omega_p \mathrm{t}))^2}$, est :

$$\sqrt{(\cos(\omega_p \mathrm{t}))^2} = \frac{\pi}{4} + (\frac{1}{2} + \frac{1}{3}\cos 2\omega_p t - \frac{1}{5}\cos 4\omega_p t + \frac{1}{35}\cos 6\,\omega_p \mathrm{t} + \cdots \text{[21]} \quad \text{(II.16)}$$

II.3.3. Modulation de fréquence (FM)

La modulation de fréquence est la transformation de la fréquence de la porteuse qui transporte l'information utile. En FM, l'information est portée par une modification de fréquence de la porteuse F(t). La FM est plus robuste lors de la transmission du message dans des conditions difficiles (atténuation et bruit importants). [33, 53]

Le spectre du signal modulé en AM, comporte trois fréquences à savoir f_p (porteuse) et deux composantes latérales $f_p - f_\Omega$ et $f_p + f_\Omega$.

Pour une modulation en fréquence, l'amplitude de la porteuse$U(t)$, reste constante. Ce pendant sa phase comprend une fréquence instantanée $f(t)$. Cette porteuse est définie de façon suivante :

$$U'(t) = U_p \cos(2\pi\left[f_p + f(t)\right]t) \quad \text{(II. 17)}$$

Où U_p est l'amplitude de la porteuse modulée en fréquence

On détermine la phase instantanée et sa fréquence instantanée.

$$\omega'_p t = 2\pi f_p t + \varphi(t) \text{ (La phase instantanée).} \quad \text{(II.18)}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\omega_p(t)}{dt} = f_p + \frac{1}{2\pi}\frac{d\varphi(t)}{dt} \text{ (Fréquence instantanée)} \quad \text{(II.19)}$$

La transformation de la variation instantanée de la fréquence du signal modulant $u(t)$ au profit de la fréquence instantanée $f(t)$ de $U(t)$. Cette transformation est en pratique toujours linéaire.

$$f(t) = f_p + ku(t) \quad \text{(II.20)}$$

Où k coefficient constant dépendant de la modulation (en Hz/V)

La phase instantanée et transformée, s'écrit alors:

$$\omega'_p(t) = \int_0^t f(t) = 2\pi f_p t + k \int_0^t u(t)\ dt \quad \text{(II.21)}$$

$$u(t) = A\cos(ft) \quad \text{(II.22)}$$

$$\omega'_p(t) = \int_0^t f(t) = 2\pi f_p t + k \int_0^t u(t)\ dt = 2\pi f_p t + \frac{kA}{f}\sin(2ft) \quad \text{(II.23)}$$

Le signal est modulé par la fréquence du signal modulant $u(t)$ s'écrit :

$$U'(t) = U_p \cos[2\pi f_p t + k \int_0^t u(t)\, dt] \quad \text{(II.24)}$$

$$U'(t) = U_p \cos[2\pi f_p t + \frac{kA}{f}\sin(2ft)] \quad \text{(II.25)}$$

On définit l'indice de modulation $\alpha = \frac{kA}{f} = \frac{\Delta f}{f}$ (II.26)

D'où l'expression définitive du signal modulé

$$U'(t) = U_p \cos[2\pi f_p t + \alpha \sin(2ft)] \quad \text{(II.27)}$$

L'analyse spectrale de ce signal montre que la variation de $f(t)$ est sinusoïdal dans l'intervalle$f_p - \Delta f\ , f_p + \Delta f$. La phase instantanée $\varphi(t)$ dépend linéairement de l'intégrale du signal primaire.

Contrairement aux définitions des modulations AM, qui établissent une relation linéaire entre $u(t) et\ U'(t)$, la relation $U(t)$ modulée en fréquence précédente lie $u(t)$ à $U'(t)$, par l'intermédiaire d'une fonction trigonométrique.

Elle n'est pas donc linéaire, en conséquence le principe de superposition n'est pas valable. Le signal $U'(t)$ modulé par la somme de deux signaux primaires n'est pas égal à la somme de deux signaux résultant de la modulation par chacun des signaux isolement. [5]

II.3.4. Indice de modulation

La dérivation de phase $\varphi(t)$ est une grandeur caractéristique important de la modulation de la fréquence par un signal sinusoïdal. On lui donne le plus souvent le nom d'indice de modulation

$$\alpha = \frac{\Delta f}{f} \qquad \text{(II.28)}$$

Il dépend à la fois de la fréquence Δf qui lui est proportionnelle et de la fréquence f

II.3.5.La démodulation de fréquence

Une démodulation FM, plus directe consiste à extraire la fréquence instantanée du signal secondaire à l'aide d'une boucle à phase asservie. [5, 8, 11]

En démodulation de fréquence, on utilise la démodulation par discriminateur qui est une des méthodes utilisées pour démoduler un signal FM.

Pour trouver ce bon signal :

1. On utiliser un filtre dérivateur

Vu que le signal FM a pour expression :

$$U'(t) = U_p \cos[\varphi_2(t)] = U_p \cos(\omega'_p t) = U_p \cos[2\pi f_p + 2\pi k \int_0^t u(t)dt] \qquad \text{(II.29)}$$

On a la dérivée du dérivateur,

$$\frac{dU\prime(t)}{dt} = -U_p[2\pi f_p t + 2\pi k u(t)] \sin[2\pi f_p + 2\pi k \int_0^t u(t)dt] \qquad \text{(II.30)}$$

Ce signal est encore un signal modulé en fréquence, mais son enveloppe est devenue une fonction linéaire du signal modulant u(t).

La dérivation de la relation $U'(t) = \frac{d\,U\prime(t)}{dt}$ présuppose que l'amplitude U'_p est constante.

2. Puis un détecteur d'enveloppe du même type (même enveloppe) que celui utilisé pour la démodulation des signaux double bande avec porteuse et mesurer à tout instant l'enveloppe du signal dérivée [5, 20]

3. Pour récupérer U(t) et comme le détecteur est insensible à la modulation/variation parasites d'amplitude du signal FM, on le précède par le discriminateur d'un imitateur, qui est un condensateur de valeur capacitive élevée. De cette façon, le détecteur est insensible à la modulation d'amplitude du signal FM.

4. En fin, on utilise successivement d'abord un filtre passe bande qui ne va laisser passer qu'une seule fréquence d'onde, celle de la porteuse. Ce filtre est un circuit LC parallèle dont la fréquence est la même que celle de l'onde que l'on veut puis un circuit RC parallèle pour supprimer la porteuse et après on utilise un circuit RC série pour supprimer la tension continue ajoutée à la porteuse. En fin le filtre passe haut [54, 55, 56,57], on obtient à la réception notre signale que l'on envoie sur un amplificateur, afin qu'il soit audible, puis sur les haut-parleurs. [5, 24, 32, 58, 59]

II.3.6. Modulation de phases

Avec le signal primaire $\mathrm{u(t)}$, la phase modulée est

$$\omega'_p(\mathrm{t}) = \omega_\mathrm{p}\mathrm{t} + \mathrm{f(t)} \qquad \text{(II.31)}$$

La dérivation de phase instantanée $\Delta\varphi(\mathrm{t})$ étant proportionnel à $\mathrm{u(t)}$

$$\mathrm{f(t)} = \beta\mathrm{u(t)}, \qquad \text{(II.32)}$$

β est le coefficient de proportionnalité en radia/v

Il en résulte de $\omega'_p(\mathrm{t}) = 2\pi\mathrm{f_p(t)} + \varphi(\mathrm{t}) = \frac{\mathrm{d}\omega_\mathrm{p}(\mathrm{t})}{\mathrm{dt}}$ (II.33)

que la dérivation de fréquence instantanée $\Delta\mathrm{f(t)}$ est alors proportionnelle à la dérivée du signal primaire :

$$\Delta\mathrm{f(t)} = \frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}\varphi(\mathrm{t})}{\mathrm{dt}} = \frac{\beta}{2\pi}\frac{\mathrm{du(t)}}{\mathrm{dt}} \qquad \text{(II.34)}$$

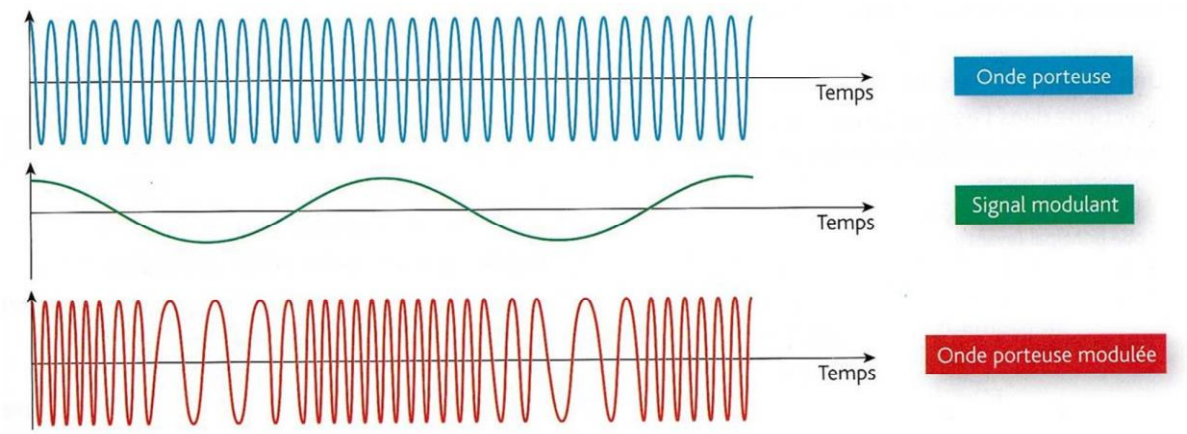


Fig. II.3. Modulation de phase [8]

La relation (II.21) en FM$\Delta\varphi(t) = 2\pi \int \Delta f(t)dt = 2\pi k \int u(f)dt$, ne se distingue que par une dérivation ou une intégration préalable du signal primaire**.**

Il existe plusieurs façons de moduler une porteuse en phase : La plus naturelle consiste à appliquer le signal modulant à un déphaseur par réseau LC ou RC.

On utilisera généralement des diodes à capacité variable. Une autre méthode consiste à additionner deux porteuses en quadrature, après avoir modulé chacune d'elles en amplitude. [8, 9, 13, 20]

II.4. Conclusion

La modulation d'amplitude AM est utilisée. Néanmoins la modulation de fréquence, moins sensible au bruit est aujourd'hui beaucoup préférée pour sa meilleur qualité de son. La modulation de phase est très efficace et même peu sensible aux bruits, mais sa mise en œuvre est plus complexe. Elle est utilisée dans les télécommunications de haute fréquence ou dans les transmissions d'informations par les fibres optiques.

CHAP III. MONTAGE DE L'EMETEUR-RECEPTEUR

Le présent chapitre montre qu'il possible de résoudre le problème présenté dans le résumé, qu'au Burundi les montages des systèmes télécoms ou des appareils électroniques sont loin d'être réalisés (absence d'esprit pratique/ savoir-faire ou savoir pratique en électronique).

Il montre les composants élémentaires et circuits ou circuits par boitiers électroniques qui entrent en jeux dans notre montage du prototype de l'émetteur- récepteur audio et leurs modes de fonctionnement et comment on a procédé. La source d'information connectée au circuit émetteur comprenant le capteur d'information lié au mélangeur. Ce mélangeur transmet cette information à l'oscillateur puis aux amplificateurs et enfin à l'antenne d'émission ou oscillent des oscillations à haute fréquences. Elle est reçue par l'antenne réceptrice connectée au démodulateur (oscillateur, mélangeur) puis aux amplificateurs qui l'amplifient avant qu'elle soit acheminée vers le haut-parleur.

III.1. Méthodologie

Le montage du prototype d'émetteur-récepteur a passé par plusieurs étapes. Nous avons commencé par une recherche documentaire sur l'internet d'un circuit simplifié de montage qui a donné une idée globale sur le prototype. C'est sur ce schéma de montage que nous nous sommes basés pour réaliser notre propre montage. Ensuite, on a identifié (le choix) les parties principales qui le constituent ainsi que des composants élémentaires ou boitiers de ces différentes parties. Puis nous nous sommes documentés aux bibliothèques sur le mode de fonctionnement de ces composants ou circuits électroniques, sur leurs caractéristiques, et sur leurs différentes façons de les adjancer pour une fonction particulière qui est de maintenir le signal à un niveau souhaité et de protéger à la fois le signal et le circuit. Par la suite nous avons réalisé une conception et une simulation guides avec un logiciel Isis Proteus afin d'éviter des mauvaises connexions pendant le montage. Après, nous avons acheté les composants pour passer au montage de notre émetteur-récepteur tel qu'il est conçu et enfin nous avons testé le produit de montage.

III.2. Les principales parties de l'émetteur-récepteur

Lors de nos recherches, nous avons trouvé qu'un système de radio communication est constitué d'une source, d'un traiteur et d'un émetteur d'information. A la réception, il est constitué d'un traiteur et restituteur d'information originale.

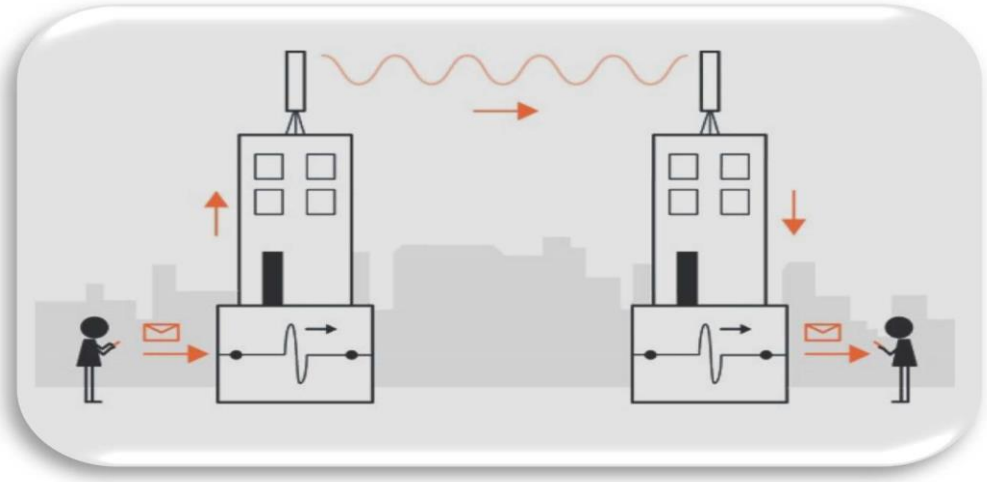


Fig. III. 1. Schéma simplifié d'un système de radiocommunication [8]

La source est un code généré par un microphone qui capte et convertit les sons humains. Ce code est ensuite appliqué au modulateur/mélangeur de façon que l'énergie de sortie de la radiofréquence du l'émetteur soit fonction de la méthode de modulation utilisée. Le récepteur sensible détecte et amplifie les signaux affaiblis par la modulation et la conversion nécessaire de code du signal de sortie.

III. 2.1. Principaux composants de l'émetteur

1. Transducteur/ADIP16-G-LC-R : L'ADIP16 G-LC-R est un dispositif sophistiqué intégrant plusieurs technologies pour fournir des mesures précises et fiables. C'est un modèle particulier de capteur utilisé dans divers domaines, notamment dans l'industrie pour la mesure de pression, de température, ou d'autres paramètres physiques. La structure interne du transducteur est conçue pour maximiser la précision, la stabilité, et la facilité d'intégration dans des systèmes plus larges c'est-à-dire qu'il est constitué du capteur principal et du conditionneur de signal

Comment le capteur fonctionne ?

Le capteur principal J_1 (**Fig.III.2)**, détecte les variations physiques (pression, température, etc.) et convertit ces variations en un signal électrique proportionnel. C'est le transducteur (Électroacoustiques) qui s'occupe de transmettre l'information sonore via le circuit émetteur. Comme le signal électrique brut provenant du capteur serrait souvent trop faible ou bruité, pour être utilisé directement, le conditionneur de signal intégré dans J_1 amplifie et filtre ce signal pour le rendre utilisable.

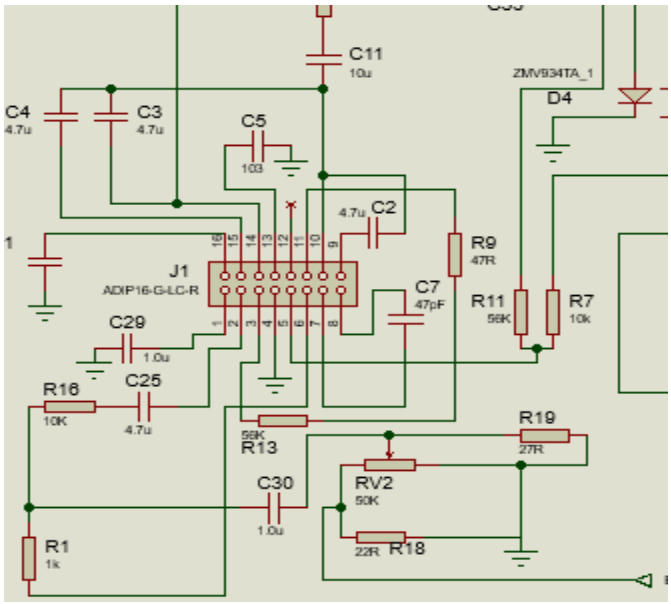


Fig. III.2. Capteur principal J_1/ADIP16-G-LC-R ou Transducteur

2. Générateur d'oscillations/Oscillateur : Un oscillateur est un circuit électronique capable de générer un signal électrique périodique (sinusoïdal, carré, triangulaire, etc.) à partir d'une source d'alimentation continue.

Un oscillateur local (OL) X_1 utilisé de **(Fig.III.3)**, est un type particulier d'oscillateur, spécifiquement utilisé dans les systèmes de télécommunication. Son rôle principal est de générer un signal de haute fréquence (fréquence porteuse) qui sera mélangé grâce **au mélangeur** simple constitué par une diode et une inductance L_3, avec le signal modulant reçu afin de produire une fréquence intermédiaire (FI) fixe.

La FI est plus facile à amplifier et à filtrer que la fréquence radio d'origine, ce qui simplifie considérablement la conception du récepteur.

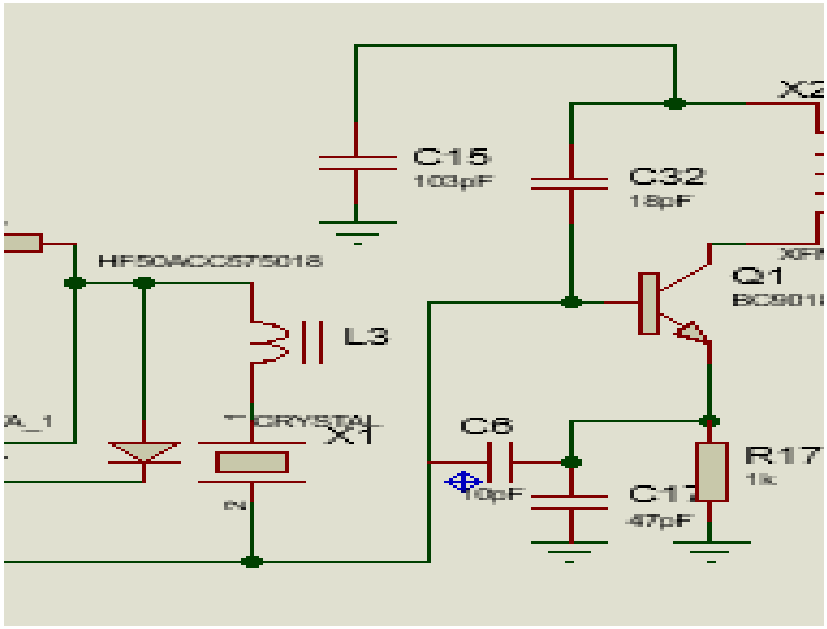


Fig. III.3. Quartz X_1/Cristal 249.6MHz : Générateur d'oscillations de 249.6MHz

3. Mélangeur ou modulateur : le mélangeur à diode est un circuit simple constitué par une diode et une inductance L_3(résistance) variable ou ajustable (**Fig.III.3)** qui est efficace pour combiner des signaux électriques en émission. C'est un outil précieux pour la modulation et la conversion de fréquence en radiofréquence. Pour des applications exigeant de meilleures performances, on peut utiliser des mélangeurs actifs (basés sur des transistors) ou des mélangeurs à double équilibré, qui offrent une meilleure linéarité, une meilleure conversion de puissance et un meilleur rejet des fréquences parasites. L'utilisation d'une diode vari cap à une bobine ajustable en liaison avec le circuit LC pour réaliser un mélangeur est une possibilité.

Voyons maintenant comment le mélangeur fonctionne.

Une diode est un composant électronique qui laisse passer le courant électrique dans un seul sens. Cette propriété de non-linéarité est essentielle pour le processus de mélanger. Lorsque deux signaux sont appliqués à la diode, la tension à travers elle varie. Cette variation de tension, due à la non-linéarité de la diode, crée des harmoniques dans le courant qui la traverse. Ces harmoniques contiennent les fréquences somme et différence des signaux d'entrée. Pour extraire les fréquences désirées (somme et différence), on utilise des filtres. Ces filtres éliminent les autres harmoniques et permettent de récupérer le signal mélangé.

Le mélangeur résistif/inductif à diode est un circuit électronique relativement simple à réaliser. Il repose principalement sur la non-linéarité de la diode pour effectuer la multiplication de deux signaux.

En ajustant l'inductance L_3, on obtient :

A. Réglage de la fréquence : La principale fonction d'une bobine IFT avec une inductance variable est de permettre le réglage précis de la fréquence d'un circuit.

B. Accord précis : Les bobines IFT avec inductance variable offrent généralement une grande précision d'accord.

C. Sélectivité du signal : En ajustant l'inductance de la bobine IFT, on peut modifier la sélectivité du signal.

D. Compensation de la dérive de fréquence : Les bobines IFT avec inductance variable peuvent également être utilisées pour compenser les variations de fréquence.

C. Gain de signal : En accordant précisément un circuit à la fréquence désirée, une bobine IFT avec inductance variable peut maximiser le gain du signal.

4. Amplificateurs : Qui amplifient la force des oscillations en gardant la fréquence choisie.

5. Antenne d'émission : Elle a pour rôle de transformer un courant alternatif issu de l'émetteur radio en une onde électromagnétique possédant les informations à transmettre : voix, music, etc.

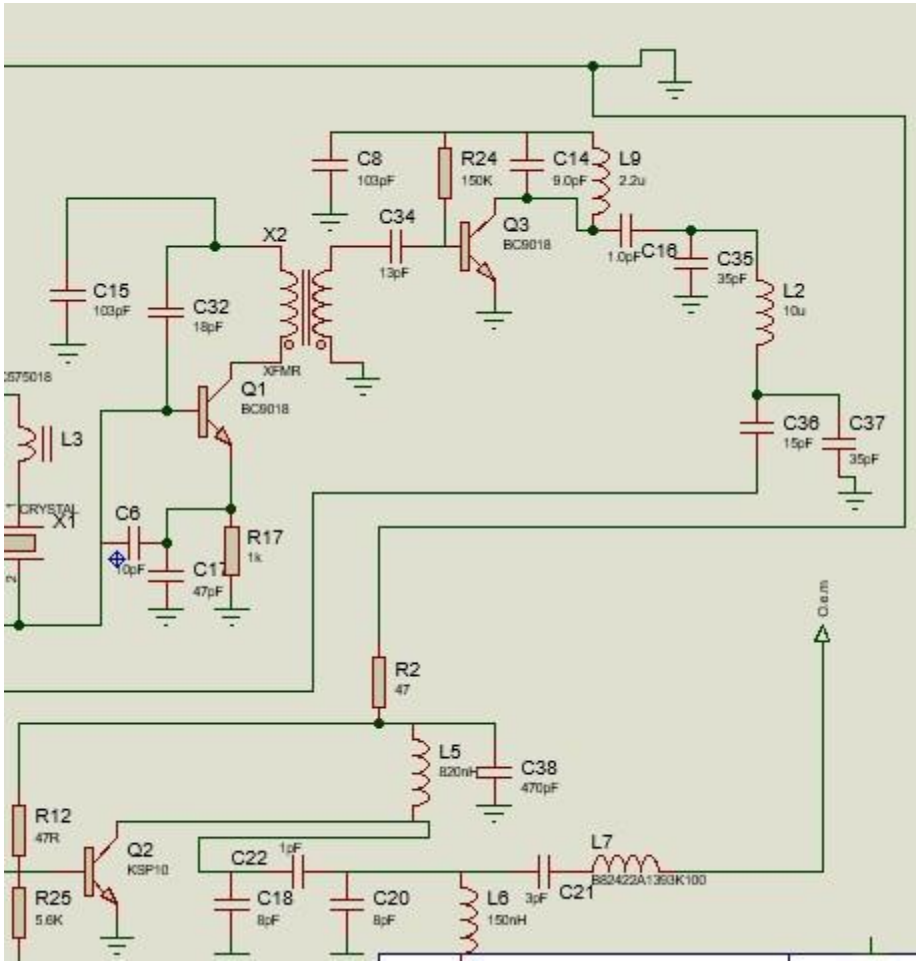


Fig. III.4. Amplificateurs /Convertisseur de survolteur (chaine à transistorQ_1 et Q_2)

Cet amplicateur ou chaine d'amplificateurs couplés par un transformateur aussi appelé convertisseur de survolteur comporte des inductances passives et des commutateurs qui font le contrôle. A partir d'une modulation d'impulsion, ce covertisseur (**Fig.III.4**), prend la tension d'entree DC, et produit une tension de sortie DC plus eleveé. Il amplifie la force des oscillations en gardant la frequence choisie. Il est terminé par l'antenne d'emission qui s'occupe de transformer un courant alternatif issu de l'emetteur radio en ondes electromagnetiques.

Un convertisseur de surtension, ou convertisseur DC/DC, a pour fonction principale d'élever une tension continue à une valeur plus élevée. En émission radio, il peut être utilisé pour :

1. Alimenter les étages de puissance de l'émetteur: Ces étages nécessitent souvent des tensions continues élevées pour amplifier le signal RF à la puissance désirée. Le convertisseur permet d'obtenir cette tension à partir de la tension d'alimentation principale, généralement plus basse.

2. Générer des tensions de polarisation: Certains composants actifs utilisés dans les émetteurs, comme les transistors de puissance, nécessitent des tensions de polarisation spécifiques pour fonctionner correctement. Le convertisseur peut être utilisé pour générer ces tensions.

III.2.1.a. Montage

Apres avoir analysé les différentes parties de l'émetteur et leur fonctionnement, nous avons passé au montage de l'émetteur en connectant les différentes composants. La figure suivante montre les parties de l'émetteur réalisé dans le cadre de ce travail.

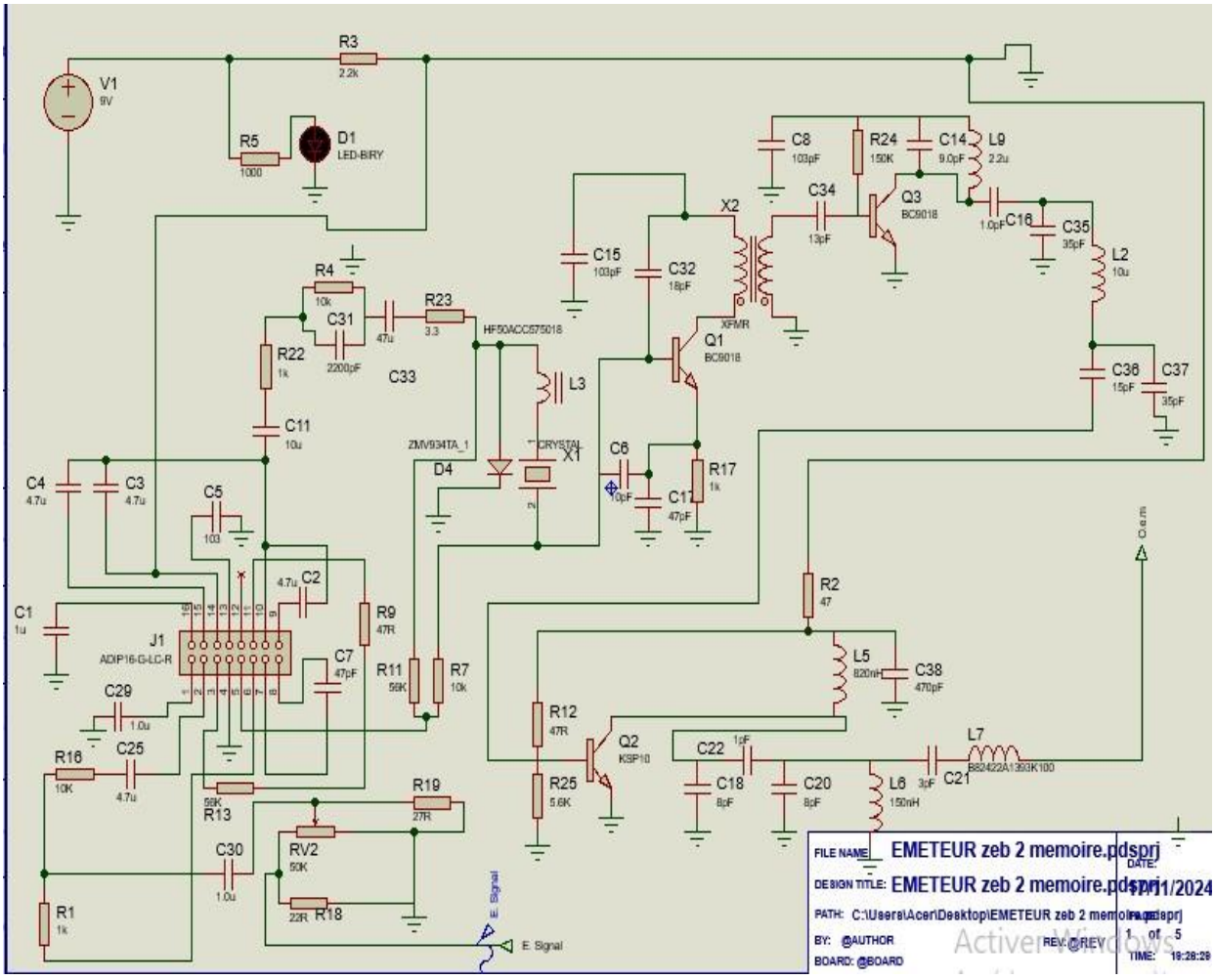
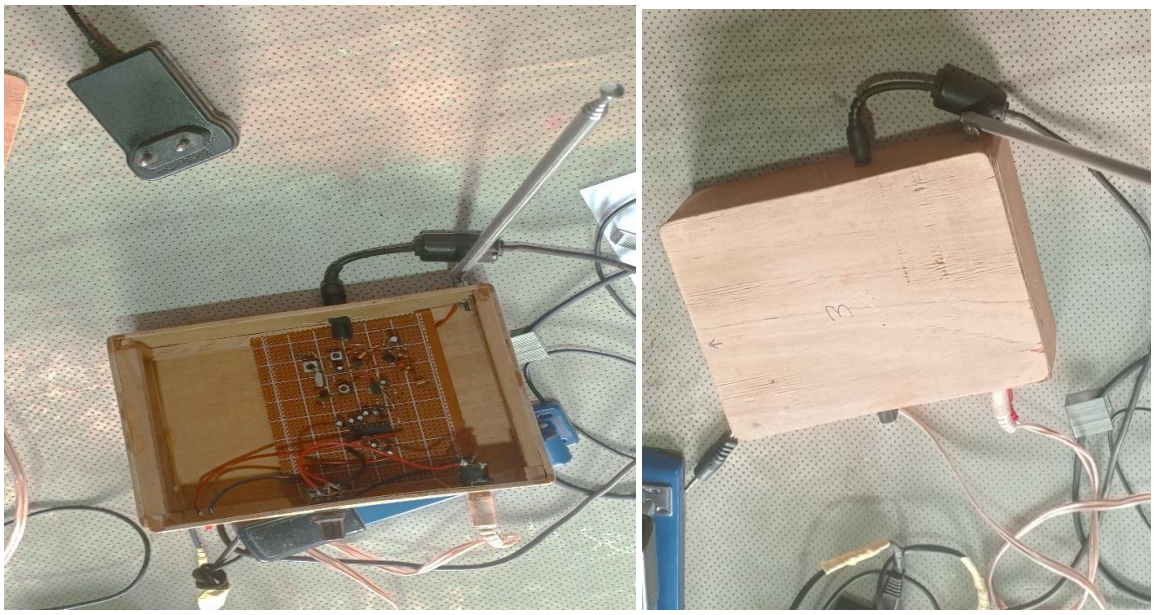


Fig. III.5. Le montage de l'émetteur par soudure avec fer à souder et étain



(a) ***(b)***

Fig. III.6. Photo de l'émetteur a l'intérieur (a) et encaisse dans la boite (b)

III.2.1.b. Les Caractéristiques d'un émetteur

Un émetteur radio est caractérisé par :

• sa puissance rayonnée ou générée par l'amplificateur final et multipliée par le gain de l'antenne dans la direction des récepteurs.

• ses émissions parasites, outre le signal utile, émetteur peut émettre plusieurs types de signaux non désirés. Toutes les émissions parasites sont spécifiées selon la puissance, la fréquence et le type de service.

• sa zone de couverture constituée par la puissance rayonnée, la distance et la propagation définit le niveau de réception, selon l'équation des télécommunications. Inversement, un émetteur permet de transmettre avec une qualité acceptable dans une zone, en supposant un type de station de réception donné.

Cette couverture permet de définir les auditeurs possibles en radiodiffusion ou télévision, ou le service dans un réseau. La couverture peut être définie avec précision si la propagation est stable, et les lobes d'antennes précisément connus, comme en télévision satellitaire ou en

téléphonie mobile. Au contraire, la propagation fluctuante MF ou HF, ne permet que des couvertures statistiques, ou variables selon le jour et l'heure.

Pour notre cas, dû au fait que la puissance appliquée à l'ADIP16-G-LC-R est trop faible (0,2Watts), la zone de couverture est de 4m environ. Elle est trouvée en écartant le récepteur lentement de l'émetteur jusqu'à ce que le récepteur ne reçoive plus de signaux. D'autres paramètres qui caractérisent notre prototype émetteur-récepteur et le canal ne sont pas déterminés car ils nécessitent l'utilisation d'un spectromètre qu'on ne dispose pas.

III.2.1.c. La fonction générale d'un émetteur radio

La fonction de l'émetteur radio est de moduler les signaux utiles porteurs d'information en onde radioélectrique de puissance suffisante pour assurer la liaison à un récepteur en réalisant successivement:

• La modulation du signal, en amplitude, en fréquence et en phase. Celle-ci est précédée du traitement du signal et du codage. [5, 8]

• L'amplification à la puissance souhaitée, très variable, de quelques milliwatts en Wifi, à quelques mégawatts en télécommunications sous-marines. [5, 8]

• Le couplage à l'espace hertzien par l'intermédiaire de l'antenne, celle-ci pouvant éventuellement être rotative. Le signal transmis par ces ondes radioélectriques peut être un programme de radiodiffusion (radio, télévision), une télécommande, une conversation (radiotéléphonie), une liaison de données informatiques, une impulsion de télédétection radar. Le contenu d'un émetteur radio varie donc énormément en taille, prix et conception, selon les applications, d'un simple «porte-clés» pour commander un portail, à une station de radiodiffusion, muni d'une antenne de plusieurs centaines de mètres. [8]

III.2.2.Les principaux composants du récepteur

Un récepteur est constitué de plusieurs composants dont le choix est fonction des caractéristiques et du monde d'utilisation. Le récepteur radio est principalement constitué des éléments suivant**:**

1. Antenne: Sa fonction est de convertir les ondes électromagnétiques provenant de l'émetteur en signal électrique qui sera appliqué au récepteur. Il existe de nombreux types d'antennes, le choix dépend principalement de la bande de fréquences que l'on désire capter.

Dans les récepteurs portatifs, l'antenne est directement raccordée au récepteur par une ligne de transmission, câble coaxial ou ligne bifilaire.

2. Démodulateur/Le CD2003GP: est un circuit intégré plus complexe utilisé principalement dans les applications de radio FM/AM. C'est un circuit intégré multifonctionnel conçu pour simplifier la conception des récepteurs radio FM/AM. En intégrant des fonctions clés telles que l'oscillateur local, le mélangeur, les amplificateurs de fréquence intermédiaire, et les détecteurs FM/AM.

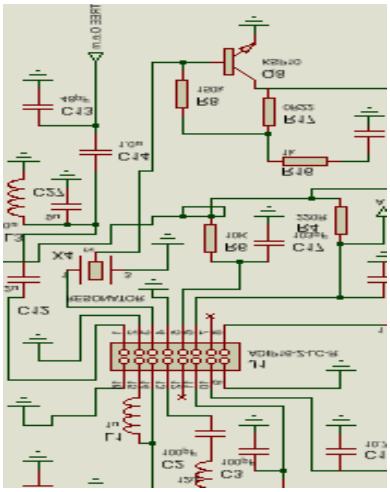


Fig. III.7. Circuit intégré CD2003GP/ ADIP16 Z-LC-R (J_1) et de l'antenne de réception

Voyons comment le CD2003GP fonctionne.

Le CD2003GP (**Fig.III.6),** combine plusieurs circuits qui réalisent les fonctions essentielles pour le traitement des signaux radio FM/AM :

Oscillateur Local (OL) qui génère une fréquence de référence pour le mélangeur, un mélangeur qui combine le signal d'antenne avec le signal de l'oscillateur local pour produire une fréquence intermédiaire (FI), un amplificateur de Fréquence Intermédiaire (FI) qui amplifie le signal de fréquence intermédiaire, un détecteur de Fréquence (FM) ou détecteur d'Amplitude (AM) qui détecte et démodule le signal audio du signal FI, un amplificateur audio qui amplifie le signal

audio pour le rendre audible via un haut-parleur et un contrôleur automatique de Gain (CAG) qui ajuste automatiquement le gain de l'amplificateur pour maintenir une sortie audio stable.

3. Le comparateur de tension /LM393 : C'est un circuit simple et polyvalent permettant de comparer facilement deux tensions analogiques. Il est un amplificateur opérationnel à double comparateur. Il est couramment utilisé pour comparer des signaux analogiques en générant a la sorties des signaux numériques en fonction des relations entre ces signaux. Chaque comparateur dispose de deux entrées, une entrée inverseur (-) et une entrée non inverseur (+).

L'architecture interne du LM393 comprend des transistors, des résistances, des sources de courant, deux amplificateurs opérationnels indépendants à faible bruit et à entrées différentielles.

Chaque ampli opérationnel possède une entrée non-inverseuse (+) et une entrée inverseuse (-). La sortie de chaque ampli opérationnel est de type "Open Collector", permettant une connexion aisée à des dispositifs externes.

Un étage de polarisation et de décalage de niveau permet d'adapter les tensions d'entrée à la plage de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel.

Des résistances de polarisation et de contre-réaction fixent le gain et les niveaux de commutation de chaque comparateur.

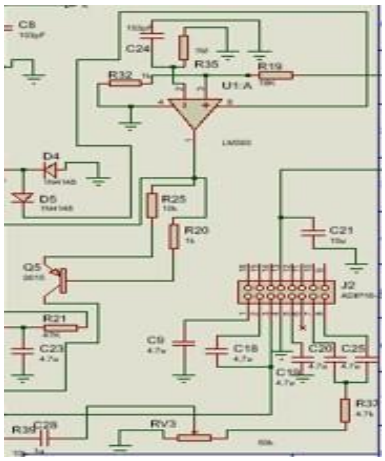


Fig. III.8. Circuit intègre LM393 U_1A Comparateur de tension de sortie.

Voyons son fonctionnement :

La LM393 compare deux tensions d'entrée analogiques (V+ et V-) et produit une sortie numérique (Open Collector) indiquant laquelle des deux tensions est la plus élevée.

Si V+ > V-, la sortie est à l'état bas (proche de 0V). Si V+ < V-, la sortie est à l'état haut (proche de la tension d'alimentation).Il peut fonctionner sur une large plage de tension d'alimentation, typiquement de 2 à 36V.

Elle est souvent utilisée pour détecter des seuils, des niveaux, des comparaisons de tension, etc. dans des applications simples.

4. Le correcteur de tonalité ou Circuit intégré JRC4558; U_4 **(Fig. III.8)**, C'est un amplificateur opérationnel (AO) et aussi un composant beaucoup plus général. Il utilisé dans une grande variété d'applications électroniques, allant de la filtration (passe bas, passe bande, passe haut,….) à l'amplification de signaux faibles.

Il est important de noter que bien qu'il soit possible de réaliser un amplificateur audio avec un 4558, il ne sera pas aussi puissant et optimisé qu'un circuit intégré spécialisé comme le TDA7379 ; J_3 **(Fig.III.8)**.

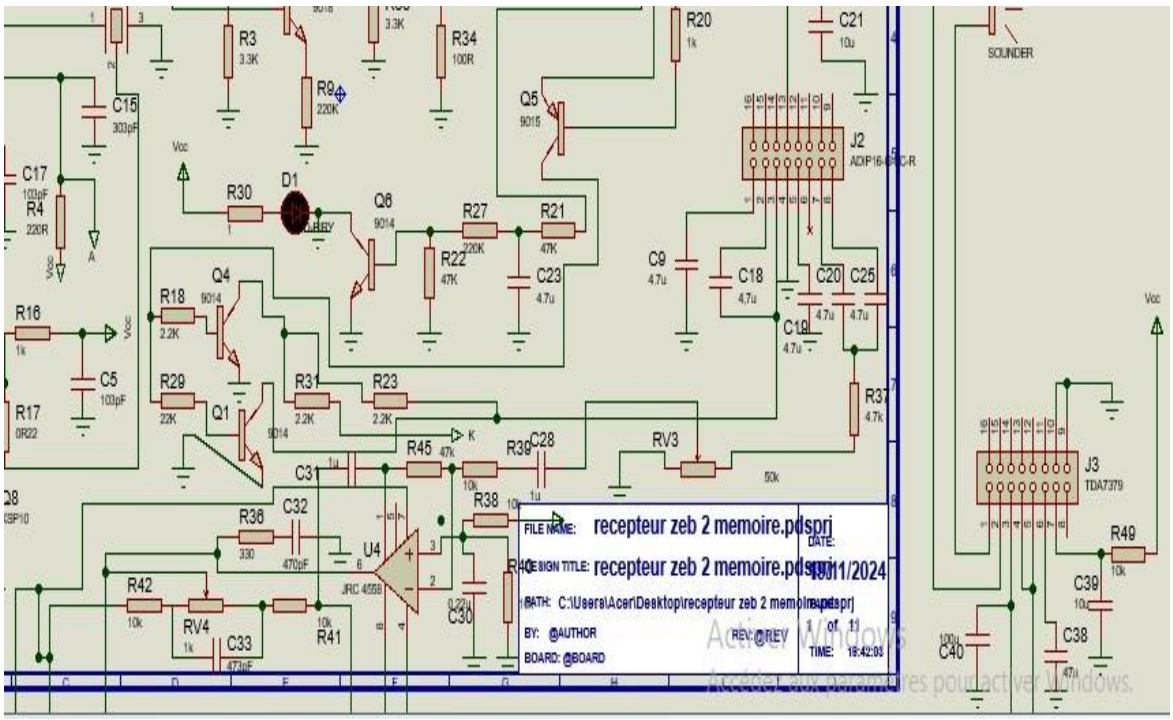


Fig. III.9. Circuit intégré JRC4558/U_4

Sa fonction principale:

Il réalise l'amplification différentielle, il amplifie la différence entre deux tensions d'entrée. Le JRC4558 est plus adapté à l'amplification opérationnelle de signaux faibles à usage général. Il peut fournir un gain très élevé, ce qui en fait un outil puissant pour amplifier de faibles signaux. Il peut amplifier des signaux sur une large gamme de fréquences. Comme l'antenne reçoit n'importe quoi qui causera les bruits, JRC4558 corrige la tonalité.

6. L'amplificateur TDA7379 J_3: C'est un circuit intégré (C.I) conçu spécifiquement pour les applications audio **(Fig. III.9)**. Il s'agit d'un amplificateur audio de puissance capable de fournir une puissance de sortie relativement élevée tout en offrant une bonne qualité sonore.

Il est souvent utilisé dans les systèmes audio de voiture, les amplificateurs home cinéma et les systèmes de sonorisation.

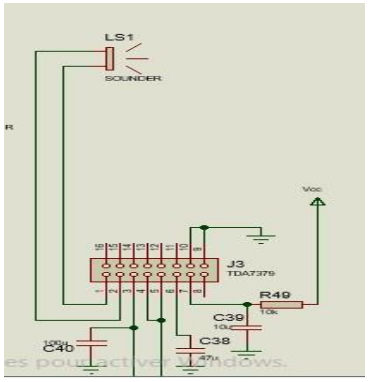


Fig. III.10. Amplificateur/Circuit intégrée TDA7379 (J_3)

Fonctionnement :

La fonction principale du TDA7379 (**Fig. III.9),** est d'amplifier un signal audio faible (comme celui provenant d'un lecteur CD ou d'un tuner radio) pour le rendre suffisamment puissant pour piloter des haut-parleurs. En d'autres termes, il augmente l'amplitude du signal audio. Son architecture interne comprend des étages d'amplification, des circuits de protection, des régulateurs de tension et d'autres éléments pour fournir une amplification audio de haute qualité.

7. Amplificateur à émetteur commun *:* L'amplificateur à émetteur commun est une configuration très utilisée en électronique, notamment dans les circuits de radiofréquence (RF) pour l'émission et la réception.

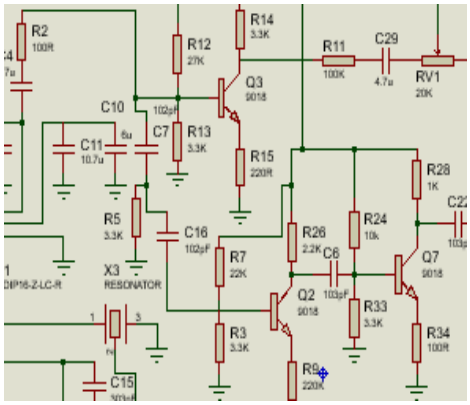


Fig. III.11. Amplificateur à émetteur commun Q_2 et Q_3.

Son fonctionnement :

L'amplificateur à émetteur commun est un outil fondamental en électronique RF grâce à ses caractéristiques intéressantes **(Fig.III.10)**. Son utilisation est répandue dans les émetteurs et les récepteurs pour amplifier les signaux et les adapter. Le transistor bipolaire, élément clé de cette configuration, fonctionne en mode actif. Le signal d'entrée est appliqué à la base, tandis que le collecteur est relié à une alimentation et l'émetteur à la masse (ou à une référence de tension). Les variations du courant de base induisent des variations proportionnelles du courant collecteur, ce qui entraîne une variation de la tension aux bornes de la charge connectée au collecteur

III.2.2.a. Le montage

Apres avoir analysé les différents composants du récepteur et leur fonctionnement, nous avons passe au montage du récepteur.

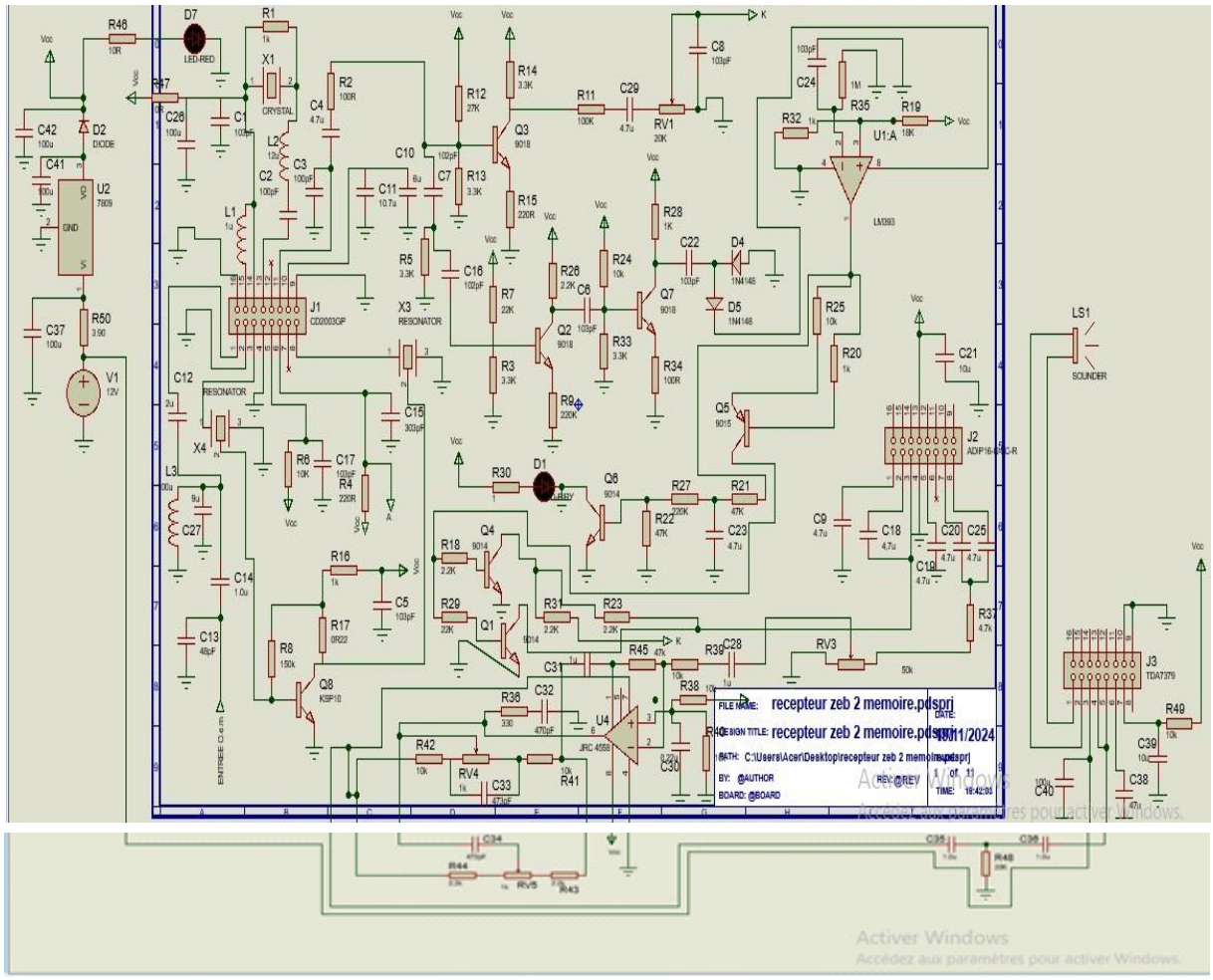
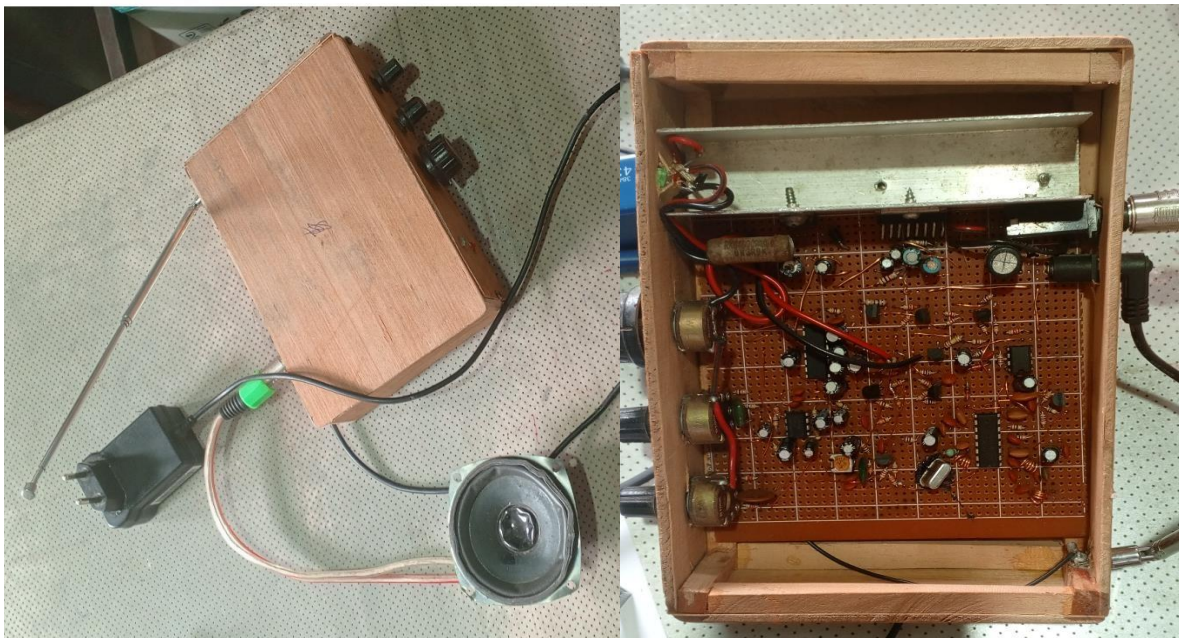


Fig. 12. Le montage de récepteur par soudure avec fer à souder et étain



(a) *(b)*

Fig. III.13. Photo du récepteur encaissé dans la boite (a) et l'intérieur de la boite (b)

III.2.2.b. Caractéristiques du récepteur

Les performances d'une chaîne de réception sont déterminées à partir de quelques paramètres caractéristiques. Les plus connues sont le facteur bruit, les non-linéarités, la dynamique de mesures, le gain et la sensibilité. Ces termes permettent de prévoir le comportement du récepteur dans un environnement donné :

• Sensibilité : Elle définit la capacité d'un récepteur à recevoir des émetteurs faibles et proches ou lointains. On définit souvent la sensibilité comme la tension qu'il faut appliquer à l'entrée pour obtenir une puissance donnée dans le haut-parleur. [5, 8]

• Sélectivité : Elle décrit l'aptitude du récepteur à séparer le signal désiré de signaux perturbateurs d'autres émetteurs à des fréquences voisines. [5, 8]

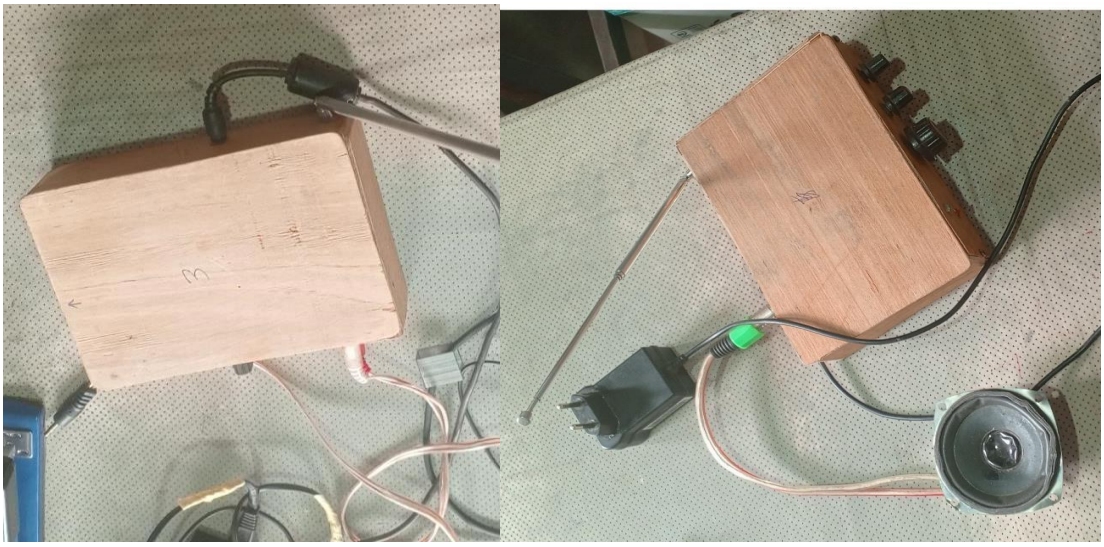
• Stabilité : Cette caractéristique indique comment l'accord du récepteur change si la température ambiante ou la tension d'alimentation changent. Dans les récepteurs superhétérodynes, les plus courants, la stabilité du récepteur est déterminée par la stabilité en fréquence de l'oscillateur local. [5. 8]

• Facteur de bruit : est le paramètre qui caractérise la dégradation de la qualité du signal suite à l'augmentation de niveau du bruit causé par le passage dans les blocs**.** [5, 8]

III.2.2.c. Fonctionnement

Évidemment, à toute chaîne d'émission, on y associe une chaîne de réception des signaux. Notre chaîne de réception est constituée d'un ensemble d'interfaces capables de restituer sous forme conventionnelle le signal transmis. La fonction principale d'un récepteur est la transposition en fréquence du signal utile primaire. Suivant la technique utilisée pour cette fonction, le récepteur peut présenter des atouts et des inconvénients.

Le canal de propagation contient non seulement le signal utile mais aussi des signaux perturbateurs au récepteur en question mais ces signaux perturbateurs sont utiles pour les autres systèmes. Si ces perturbateurs sont situés dans un canal fréquentiel suffisamment lointain, ils ne rompraient jamais le bon fonctionnement de notre récepteur ; s'ils sont proches, ils risquent de le perturber. De plus, le récepteur doit être capable de capter un signal suffisamment faible. Toutes ces conditions sont traduites en termes de caractéristiques qui dimensionnent le récepteur. L'antenne réceptrice doit être installe en hauteur car plus elle est haute, plus la portée est grande.



(a) *(b)*

Fig. III.14. Photo de l'émetteur (a) et du récepteur (b)

III. 3. Conclusion

Apres avoir passé par tous les étapes présentés dans la méthodologie, le montage nous a conduit à un prototype d'un émetteur-récepteur fonctionnel. Il est caractérisé par une puissance théorique rayonnée de 4Watts, une fréquence de 249.6MHz et une distance de radiofréquence 4m environ. L'usage du logiciel Isis Proteus, nous a permis de réaliser l'adjancément des composants et des connexions sans erreur. Ainsi, nous avons réussi à simuler la circulation électrique dans l'émetteur-récepteur. Cependant, nous n'avons pas pu bien simuler l'avancée du signal dans notre circuit et le détecter à la sortie du récepteur (haut-parleur) car la maitrise du logiciel est limitée.

CHAPITRE IV. CONCLUSION GÉNÉRALE

Les systèmes émetteur- récepteur localement montés, seront très utiles pour notre société Burundaise. Dans la vie de tous les jours, ils sont d'une grande utilité, on les rencontre, en communication oral, en télécommunication, en institutions de radiodiffusion, en téléphonie mobile, en aéronautique, en géo positionnement (GPRS),…….Leur champ d'application est si vaste et pourtant leurs montages sont loin d'être réalisés ici au Burundi.

Le présent travail de montage d'un émetteur- récepteur est la réussite pour notre pays. Il prouve qu'il est possible de nous approprier des éléments électroniques qui se trouvent sur nos marchés locaux pour réaliser différents montages des systèmes ou appareils électroniques comprenant les systèmes télécoms utiles. Ils sont d'intérêt économiquement et socialement public comme c'est montré dans l'introduction générale, où on a présenté les concepts généraux, l'objectif et intérêt public de la recherche sur la société et sur l'économie de notre pays. Dans le premier chapitre, les ressources électriques telles que les ondes dont leurs propriétés, leurs phénomènes liés à la propagation des ondes ainsi que des paramètres du canal qu'on doit exploiter pendant la mise en place de tels systèmes, sont d'une importance capitale dans l'avancement en radiotechnique. Dans le deuxième chapitre, les radiotechniques liées aux modulations des ondes radio (adaptation l'information au canal) sont à utiliser pour acheminer l'information jusqu'à la réception et le dernier chapitre nous avons présenté la méthodologie et les composants utilisés pour réussir notre montage du prototype d'émetteur-récepteur.

Grâce aux composants électroniques disponibles au marché local, nous avons réussi à monter un prototype d'émetteur-récepteur de communication/transmission sans fil fonctionnel. Ce prototype utilise un support électromagnétique et un model très simple de canal. Il est classé parmi les réseaux sans fil de type WPAN qui utilisent une faible zone de couverture c'est-à-dire faible distance de liaison radioélectrique environ de 4m, a une fréquence fixe de 249,6MHz avec une faible puissance théorique d'émission de 0,2 Watts et de 1m environ de longueur d'onde.

Nôtre prototype d émetteur-récepteur peut servir du matériel didactique en section de télécoms, peut être installé quelque part comme une nouvelle institution de radio diffusion ou employer comme téléphone mobile après avoir connu des meilleurs perfectionnements techniques surtout esthétiques et par conséquent il pourrait être exporté pour apporter de devises.

Lors de la réalisation de ce travail de recherche nous avons rencontré deux problèmes majeurs. Premièrement nous avons manqué du spectromètre pour mesurer la puissance d'émission et celle de réception ainsi que des paramètres caractéristiques de notre émetteur-récepteur et du canal qui devraient être précisés. Deuxièmement, pour vérifier s'il n'y a pas d'erreurs dans différents circuits de notre émetteur-récepteur, nous avons utilisé le logiciel Isis Proteus. Cependant, nous n'avons pas pu bien simuler l'avancée du signal dans notre circuit et le détecter à la sortie du récepteur (haut-parleur).

Le travail de recherche n'est jamais terminé, d'autres pourraient aller plus loin en réalisant par intégration un système complet (offrant plusieurs services), cohérant, efficaces et ayant des infrastructures surdimensionnés avec des simulations bien perfectionnées grâce à ce logiciel. Dans ce cas le réseau serait de type WMAN.

REFERENCES

1. Joannon, Y., Beroulle, V., Khouri, R., Tedjini, S., Robach, C., & Carbonero, J. L. (2006, May). Modélisation comportementale d'un émetteur récepteur W-CDMA en VHDL-AMS. In *9ièmes Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM'06)* (p. 1).

2. Terrasson, G. (2008). *Contribution à la conception d'un émetteur-récepteur pour microcapteurs autonomes* (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

3. Spina, P., & Viallon, M. (2016). La pratique des réseaux sociaux par les diffuseurs télé: un nouvel espace de liberté pour le téléspectateur et de gestion des audiences pour l'émetteur. *ESSACHESS–Journal for Communication Studies*, *9*(2 (18)), 101-112.

4. Dréan, S. (2012). *Oscillateur de puissance en ondes millimétriques* (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).

5. Mabrouk, K. (2008). *Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO avec Formation Numérique de Faisceaux en réception; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro-IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q* (Doctoral dissertation, Télécom Paris Tech). (pp. 7-83).

6. Bogdan, C., & Bowers, J. (2007). Tuning in: Challenging design for communities through a field study of radio amateurs. In *Communities and Technologies 2007: Proceedings of the Third Communities and Technologies Conference, Michigan State University 2007* (pp. 439-461). Springer London.

7. Velluet, M. T., Védrenne, N., Artaud, G., & Lacoste, F. (2014). Télécommunications optiques spatiales. *Photoniques*, (73), 34-38.

8. Baha, A. A. Ondes radio et leurs applications. Falcinelli, F. (2013). (pp. 2-18).

9.http://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-ondes-electromagnetiques-communication.aspx

10. Club, C. A. R. CERN Amateur Radio Club: Le monde à portée d'ondes. *Bulletin CERN*, *10*, 96-43.

11. Combes, P. F. (1997). Micro-ondes. In *1st, Lignes, Guides et cavités* (pp. 71-79).

12. https://hal.science/hal-01021968 (pp. 625-639).

13.http://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-ondes-electromagnetiques-communication.aspx

14. Chébli, R. (2007). *Techniques de conception de nouveaux circuits intégrés haute tension CMOS dédiés aux émetteurs ultrasoniques*. École Polytechnique de Montréal. (pp. 14-45, pp. 141-146).

15. https://bouquiniste-chella.com/produit/kalachnikov-electricite-ed-mir-moscou1980/ (pp. 2-22)

16. https://fr.shopping.rakuten.com/offer/buy/219986936/traite-d-electricite-publie-sous-la-direction-de-g-goudet-tome-3-l-electricite-et-la-matiere-de-georges-goudet-francois-bertein-jacques-chanu-marius-chemla-g-fournet-daniel-quemada. (pp. 250-291)

17. https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM10/RM10B05.html

18. Lavoie, E. (1971). L'évolution de la radio au Canada français avant 1940. *Recherches sociographiques*, *12*(1), 17-49.

19. Alem, N. (2019). *Développement de l'émetteur hyperfréquence d'un système Lidar-Radar pour des applications optiques marines* (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).

20. Bodson, D. (1986). Electromagnetic pulse and the radio amateur. *QST Magazine*, *34*.

21. https://www.amazon.fr/Trait%C3%A9-d%C3%A9lectricit%C3%A9-XVIII-Syst%C3%A8mes-t%C3%A9l%C3%A9communication/dp/2880743133

22. GANDONOU, S. G., & NASSARA, L. (2013). *Etude des installations du centre émetteur de sehoue dans le cadre du projet de couverture radiophonique et televisuelle integrale du territoire national par l'Office de Radiodiffusion et Télévision du Bénin (ORTB)*. EPAC/CAP/UAC.

23. Azarian, A. (2012). *Combinaison cohérente de lasers à fibre: étude en régime impulsionnel et mise en phase d'un grand nombre d'émetteurs* (Doctoral dissertation, Télécom ParisTech).

24. https://theses.hal.science/tel-00697130/document

25. ELIE, H. G., & HUGON, P. Détection d'obstacles à la navigation sans visibilité. *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 345-353.

26. Lin, C. L., Bai, B. R., Du, L. C., Hu, C. T., Young, S. T., & Kuo, T. S. (2000). A novel speech controller for radio amateurs with a vision impairment. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, *8*(1), 89-93.

27. Proakis, J. G., & Salehi, M. (2001). *Digital communications* (Vol. 4, pp. 593-620). New York: McGraw-hill

28. Sklar, B. (2001). *Digital communications* (Vol. 2, p. 1011). Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice hall.

29. On, S. S. I. (1985). *Digital communications*. Van Nostrand Reinhold, New York.

30. Sohtsinda, H. (2017). *Approche conjointe canal et amplificateur d'émission pour l'allocation dynamique de puissance dans les systèmes MIMO-OFDM* (Doctoral dissertation, Université de Poitiers).

31. Saouane, S., Ferhat, H., Hamouda, A., & Bordji, B. (2020). Réalisation par simulation d'un émetteur d'impulsions solitoniques à un débit de 40 GHz pour un système de télécommunication optique.

32. Lecointre, A. (2010). *Interface radio IR-UWB reconfigurable pour les réseaux de microsystèmes communicants* (Doctoral dissertation, INSA Toulouse). (RADIO)

33. Uribe, C., & Grote, W. (2009, December). Radio communication model for underwater WSN. In *2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security* (pp. 1-5). IEEE.

34. Terrasson, G. (2008). *Contribution à la conception d'un émetteur-récepteur pour microcapteurs autonomes* (Doctoral dissertation, Universite Sciences et Technologies-Bordeaux I).

35. Hamouda, C. (2014). *Étude d'une architecture d'émission/réception impulsionnelle ULB pour dispositifs nomades à 60 GHz* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

36. CAMUS, M. (2008). Architecture de réception RF très faible coût et très faible puissance. *Application aux réseaux de capteurs et au standard ZigBee, These de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III*.

37. Mouton, B., Vincent, F., & Nouals, C. (2005). Réalisation d'un RADAR de poursuite. *J3eA*, *4*, 032.

38. Lamy, H. BRAMS-un réseau belge pour la détection radio des météores.

39. Barbot, N., Sahuguede, S., & Julien-Vergonjanne, A. (2013, September). Performances du contrôle d'erreur d'une transmission optique sans fil dédiée à une application de télé-surveillance mobile. In *24e Colloque GRETSI* (pp. ID-92).

40. Deltimple, N. (2005). *Etude et réalisation d'un amplificateur de puissance reconfigurable en technologie BiCMOS SiGe pour des applications multi-standards GSM/DCS/UMTS* (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

41. Gonnard, O. (2001). *Efficacité d'isolation dans les circuits intégrés de puissance isolés par jonction* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

42. https://www.lemicrophone.fr/index.php/systemes-sans-fil.html

43. Abelló Barberán, A. (2015). Étude d'un émetteur-récepteur faster-than-Nyquist de faible comple xité pour les communications par satellite.

44. Spina, P., & Viallon, M. (2016). La pratique des réseaux sociaux par les diffuseurs télé: un nouvel espace de liberté pour le téléspectateur et de gestion des audiences pour l'émetteur. *ESSACHESS–Journal for Communication Studies*, *9*(2 (18)), 101-112.

45. Goavec-Merou, G., Friedt, J. M., & Meyer, F. (2019). Leurrage du GPS par radio logicielle

46. Agoussou, M. (2019). modulation RZ-DPSK optique pour le réseau d'accès optique passif multiplexé en longueurs d'onde (WDM-PON). *Afrique SCIENCE*, *15*(4), 96-105

47. Heurguier, D. (2014). La localisation d'émetteurs de radiocommunication en zone urbaine. *Journées Scientifiques URSI France*.

48. Azarian, A. (2012). *Combinaison cohérente de lasers à fibre: étude en régime impulsionnel et mise en phase d'un grand nombre d'émetteurs* (Doctoral dissertation, Télécom ParisTech).

49. PISCHELLA, M., ZAKARIA, R., & LE RUYET, D. Multiplexage des objets communiquant de façon asynchrone avec des modulations multi-porteuses filtrées.

50. Moradi, A. (2014). *Low-Power High Data-Rate Wireless Transmitter For Medical Implantable Devices* (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).

51. DE DK, A. T. B. E. C. H. C. Y., IE, E., LU, I., & MC NL PT SE, T. R. (2000). European Patent Specification. *IMMUNOGENETICS*, *51*(4-5).

52. Ricard, J. C. (2013). *Développement d'un système émetteur–récepteur à géométrie fixe pour levés géophysiques à impulsion électromagnétique*. University of Ottawa (Canada).

53. Kraemer, M., Dragomirescu, D., & Plana, R. (2009, May). Conception et modélisation d'une tête RF pour un émetteur récepteur impulsionnel à 60 GHz en technologie CMOS sub-micronique. In *Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique 2009 (JNRDM 2009)*.

54. https://www.ammareal.fr/livre/2307723-c-496-203-traite-delectricite-volume-xix-filtres-electriques-9782604000211.html

55. https://www.epflpress.org/produit/575/9782880743154/filtres-electriques-te-volume-xix

56. https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/traite-d-electricite-volume-xix-filtres-electriques-9782880743154/

57. http://www-lpl.univ-paris13.fr/pon/lumen/documents/Cours_complet.pdf

58. Laster, C. (1994). *The beginner's handbook of amateur radio*. Tab Books.

59. RADIO, A. THE BEGINNER'S HANDBOOK OF AMATEUR RADIO. (pp 71-377)