

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

**Spécialité** : Réseaux et Télécommunications

Par : **HARBI MOHAMMED** et **LABDI HAMZA**

**Sujet**

**SIMULATION SOUS ADS D'UNE CHAINE DE  
TRANSMISSION Wi-Fi**

Soutenu publiquement, le **12/ 09 / 2020**, devant le jury composé de :

Mr F.T BENDIMERAD	Professeur Univ. Tlemcen	Président
Mr. S.M MERIAH	Professeur Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr M. BOUSAHLA	Maître de Conférences Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr F.DERRAZ	Maître de Conférences Univ. Tlemcen	Examinateur

# *Remerciements*

Avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** de nous avoir donné la volonté, la santé et la patience. Durant nos années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.

Au terme de la préparation de ce mémoire de master, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, commençant par Mr S.M MERIAH, Professeur à l'université de Tlemcen et directeur du laboratoire de Télécommunications de Tlemcen LTT, pour l'encadrement de ce projet de fin d'études.

Nous exprimons nos sincères remerciements aux membres du jury, d'avoir accepté d'examiner notre projet de fin d'études.

Nos vifs remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
L'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure*

*Bonne santé et longue vie.*

*Mes chères sœurs : Faiza, Asma, Leyla, Sakina et leurs petites familles*

*spécialement : Sadjia, Djawed, Razane, Khalil, qui m'avaient toujours*

*soutenu et encouragé*

*Et une spéciale dédicace à Nassima pour son soutien morale*

*Mes chères amis : Houdaifa, Samir, Djilali, Abderrahmane, Omar,*

*Mohammed*

*Tous mes collègues de travail : Fouzi, Kamal, Soulef, Slimane...*

*Et enfin mes camarades : Hamza, Nabil, Ilyes, Khalil, Housseem, Salah*

*et Abd el ileh .*

**HARBI MOHAMMED**

# *Dédicaces*

*A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection*

*A mes chères sœurs et leurs enfants : Ikram et Yassine , source de  
joie et de bonheur*

*A toute ma famille, source d'espoir et de motivation*

*A tous mes amis*

**LABDI HAMZA**

# Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est axé sur l'étude et la conception d'un système RF pour des applications WIFI.

Pour cela, nous avons effectué la conception et la simulation des différents blocs d'un système de télécommunications Radio fréquence (RF). Le développement de ce système consiste en un émetteur-récepteur et un canal Radio. Les différentes simulations ont été réalisées en utilisant le logiciel ADS. Un système de transmission dans la bande 2.4 GHz a été étudié afin d'évaluer les paramètres permettant de juger les performances du système.

**Mots-clés :** Chaîne de transmission Radio, Emetteur, Récepteur, WIFI, ADS, Analyse.

## ملخص

يركز العمل المقدم في هذه الرسالة على دراسة وتصميم نظام RF لتطبيقات WIFI. لهذا الغرض، قمنا بتصميم ومحاكاة الكتل المختلفة لنظام اتصالات التردد اللاسلكي (RF). يتكون تطوير هذا النظام من جهاز إرسال واستقبال وقناة راديو. تم إجراء عمليات المحاكاة المختلفة باستخدام برنامج ADS. تمت دراسة نظام الإرسال في النطاق 2.4 جيجا هرتز من أجل تقييم المعلمات التي تسمح بالحكم على أداء النظام. الكلمات الرئيسية: سلسلة الإرسال اللاسلكي، المرسل، المستقبل، WIFI، الإعلانات، التحليل.

## Abstract

The work presented in this dissertation focuses on the study and design of an RF system for WIFI applications.

For this, we carried out the design and simulation of the different blocks of a Radio Frequency (RF) telecommunications system. The development of this system consists of a transceiver and a radio channel. The various simulations were carried out using the ADS software. A transmission system in the 2.4 GHz band has been studied in order to evaluate the parameters allowing to judge the performance of the system.

**Keywords:** Radio transmission chain, Transmitter, Receiver, WIFI, ADS, Analysis.

# Sommaire

Liste des acronymes.....	12
Introduction :.....	1
Chapitre1 : Système de communication Radio fréquence(RF).....	2
I.1. Introduction : .....	2
I.2. Un système de communication :.....	2
I.2.1 Définition : .....	2
I.2.2 Une brève histoire des systèmes et réseaux de télécommunications : .....	3
I.2.3 Chaîne de transmission :.....	3
I.2.3.1 La source : .....	4
I.2.3.2 Codage source .....	4
I.2.3.3 Codage canal : .....	5
I.2.3.4 La modulation.....	5
I.2.3.5 Canal de transmission :.....	5
I.2.3.6 Récepteur :.....	6
I.3. Système radio fréquence (RF) :.....	6
I.3.1 Définition : .....	6
I.3.2 Architecteur d'un système radio fréquence : .....	7
I.3.2.1 Architecture analogique :.....	7
I.3.2.2 Architecture numérique :.....	8
I.4. Emetteur-Récepteur RF :.....	9
I.4.1 Emetteur RF : .....	9
I.4.1.1 Emetteur de type hétérodyne.....	9
I.4.1.2 Emetteur à conversion directe ou homodyne .....	10
I.4.1.3 Emetteurs à fréquence intermédiaire .....	11
I.4.2 Récepteur RF :.....	11
I.4.2.1 Récepteur hétérodyne.....	12
I.4.2.2 Récepteur à conversion directe :.....	13
I.4.2.3 Récepteurs à faible fréquence intermédiaire :.....	14
I.5. Génération du signal RF par détection hétérodyne :.....	14
Chapitre2 : Modulation et filtrage dans une chaîne de transmission .....	16
II.1 Introduction : .....	16

II.2 La modulation :	16
II.2.1 Définition de la modulation	16
II.2.2 Les différentes modulations.	16
II.2.2.1 Modulation d'amplitude	16
II.2.2.2 Modulation en fréquence	17
II.2.2. 3 Modulation en phase	17
II.2.3 Les intérêts de modulation	18
II.2.4 Génération d'un signal RF modulé	18
II.2.4.1 Etude de la source temporelle	19
II.2.4.2 Etude de la source fréquentielle	20
II.2.4.3 Etude du signal modulé	21
II.3 Filtrage	22
II.3.1 Filtrage des sources modulées	22
II.3.2 Rôle des filtres RF dans les chaînes de télécommunication	23
II.3.3 Emplacement d'un filtre passe bande	24
Chapitre3 : Amplificateurs de Puissances et Amplificateurs à faible bruit	26
III.1 Introduction :	26
III.2 Les amplificateurs de puissance pour les communications RF	26
III.2.1 Définition d'un amplificateur de puissance	26
III.2.2. CARACTÉRISTIQUES D'UN AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE	28
III.3. CLASSIFICATION DES AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE	29
III.3.1Les classes de fonctionnement	29
III.3.2. Amplificateurs de puissance Classe A	30
III.3.3 Amplificateurs de puissance Classe B	30
III.3.4Amplificateurs de puissance Classe AB	31
III.3.5 Amplificateurs de puissance Classe C	32
III.3.6 Amplificateurs de puissance Classe E	33
III.3.7Amplificateurs de puissance Classe F	34
III.2.Amplificateurs à faible bruit LNA	35
III.2.1. Introduction	35
III.2.2 Caractéristiques d'un LNA :	36
III.2.3. Architectures de base des LNA	37
III.2.3.1. LNA à terminaison résistive	37
III.2.3.2. LNA à terminaison $1/g_m$	38

III.2.3.3. LNA à contre réaction résistive .....	38
III.2.3.4. LNA à dégénérescence inductive.....	39
III.2.4 Conception des amplificateurs à faible bruit .....	41
III .3 Simulations sous ADS .....	43
Chapitre4 : Simulations et interprétations des résultats .....	46
I. Introduction .....	46
II. Synoptique d'une architecture d'émetteur-récepteur RF.....	46
II.1. Métriques des récepteurs RF .....	47
II.2. Critères de qualification d'un émetteur-récepteur .....	48
III. Composants du sous-système émetteur /récepteur .....	48
III.1 Mélangeur .....	49
III.2 Filtre.....	50
III.3 Oscillateur .....	50
III.4 Butterworth .....	51
III.5 Les antennes .....	52
III.6 Contrôle Automatique du Gain .....	52
IV. Le circuit de simulation sous ADS .....	53
V. Résultats et analyse .....	54
Conclusion générale.....	63
•Références bibliographiques .....	65



# Liste des figures

Figure I.1 : Chaîne de transmission.....	4
Figure I.2 : le codage de source .....	5
Figure I.3 : Synoptique d'une chaîne de transmission RF. ....	6
Figure I.4 : Émetteur RF analogique.....	7
Figure I.5 : Récepteur RF analogique. ....	8
Figure I.6 : Émetteur RF numérique.....	8
Figure I.7 : récepteur RF numérique.....	9
Figure I.8 : Émetteur hétérodyne .....	10
Figure I.9 : Synoptique d'un émetteur à conversion directe.....	10
Figure I.10 : Émetteur à fréquence intermédiaire.....	11
Figure I.11 : Principe de Récepteur hétérodyne.....	13
Figure I.12: Récepteur homodyne .....	13
Figure I.13 : Récepteur à faible FI .....	14
Figure II.1: les différents types de modulation.....	18
Figure II.2: schématique de la simulation d'une source temporelle. ....	19
Figure II.3:Résultat de la simulation d'une source temporelle .....	20
Figure II.4:Schématique d'une source fréquentielle.....	21
Figure II.5:schématique de la simulation d'enveloppe. ....	21
Figure II.6:Spectre sans filtre .....	22
Figure II.7 Architecture superhétérodyne d'une chaîne d'émission-réception .....	23
Figure II.9 Spectre du signal modulé après filtrage. ....	25
Figure III .1: Synoptique d'un amplificateur de puissance RF. [24] .....	27
Figure III .2 : Bilan de puissance [25] .....	28
Figure III.7:Amplificateur de classe A.....	30
Figure III .8:Amplificateur de classe B .....	31
Figure III.9:Amplificateur de classe AB.....	32
Figure III.10:Amplificateur de classe c .....	32
Figure III .7: Schéma de principe d'un amplificateur de classe E.....	33
Figure III.8: Formes d'ondes recherchées dans l'interrupteur d'un amplificateur de classe E .....	34
Figure III .9 : Schéma de principe d'un amplificateur de classe F .....	35
Figure III.10 : Placement du LNA dans une chaîne de communication.....	35

Figure III.11 : Amplificateur à terminaison résistive .....	37
Figure III.12 : Amplificateur à terminaison en $1/g_m$ .....	38
Figure III.13 : Amplificateur à contre réaction résistive .....	38
Figure III.14 : Amplificateur à dégénérescence inductive .....	39
Figure III.15 : LNA à gain et NF optimisé .....	40
Figure III.16 : cercles à facteur de bruit constante, point $m_1$ correspond à $\Gamma_{opt}$ .....	43
Figure III.17 Simulation avec une impulsion RF. ....	43
Figure III.18 Résultat de simulation .....	44
Figure III.19 Sélection de la fonction $t_s$ .....	45
Figure III.20 Simulation avec $t_s(v_{out})$ . ....	45
Figure IV.1. Schéma synoptique d'un système de communication sans fil .....	46
Figure IV.2 : Schéma synoptique d'un système radio sans fils .....	47
Figure IV.3 Environnement d'un récepteur RF .....	48
Figure IV.4 Illustration des fonctions Up- et Down- Converter .....	49
Figure IV.5 Exemples de formes d'ondes de signaux périodiques .....	51
Figure IV.6 Schéma de l'émetteur-récepteur sans fil RF sous ADS .....	53
Figure IV.7 Spectre du signal en bande de base en dBm .....	54
Figure IV.8 Spectre du mélangeur .....	55
Figure IV.9 Spectre Filter1 .....	56
Figure IV.10 Spectre Amp1 .....	57
Figure IV.11 Spectre de Link1 à 1 km .....	57
Figure IV.12 Spectre de fréquence du filtre 2 en dBm .....	58
Figure IV.13 Spectre de fréquence Amp2 .....	59
Figure IV.14 Spectre de fréquence de Mixer2 en dBm .....	60
Figure IV.15 Spectre de fréquence du filtre 3 en dBm .....	60
Figure IV.16 Spectre de fréquence d'Amp3 en dBm .....	61
Figure IV.17 Spectre de fréquence du mélangeur3 en dBm .....	61
Figure IV.18 Spectre de fréquence .....	62

# Liste des tableaux

Tableau II.1 Tableau de résultat de la simulation temporelle.....	20
Tableau III.1 : Comparatif des topologies de base des LNAs.....	41

## Liste des acronymes

- **ADS**            **A**dvanced **D**esign **S**ystem
- **BER**            **B**it **E**rror **R**ate
- **DBI**            **D**écibel **I**sotrope
- **DBM**           **D**écibel **M**illiwatt
- **GHZ**           **G**igahertz
- **HB**            **H**armonic **B**alance
- **HF**            **H**igh **F**requency
- **ISI**            *Interférence Inter Symbole*
- **IF**            **I**ntermediate **F**requency
- **PA**            **P**ower **A**mplifier
- **RF**            **R**adio **F**réquence
- **SNR**           **S**ignal-**T**o-**N**oise **R**atio
- **RF**            **F**réquence **R**adio(Radio Frequency)
- **WIFI**          **W**ireless **F**idelity
- **LNA**          **L**ow **N**oise **A**mplifier
- **LO**            **L**ocal **O**scillator
- **NF**            **N**oise **F**igure
- **PIRE**          **P**uissance **I**sotrope **R**ayonnée **E**quivalente
- **PLL**          **P**hase **L**ocked **L**oop
- **MHZ**          **M**ega **H**ertz
- **RX**            **R**éception
- **TX**            **T**ransmission (Emission)
- **SAW**          **S**urface **A**coustic **W**ave
- **QPSK**        **Q**uadrature **P**hase-**S**hift **K**eying
- **GSM**          **G**lobal **S**ystem for **M**obile **C**ommunications

# **Introduction**

# Introduction

---

## Introduction :

L'évolution croissante des télécommunications a conduit à une normalisation des systèmes de communications. Le **Wi-Fi**, aussi orthographié **wifi** est un ensemble de protocoles de communication **sans fil** régis par les normes du groupe IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802-11). Un réseau **Wi-Fi** permet de relier par ondes radio plusieurs appareils informatiques (ordinateur, routeur, smartphone, modem Internet, etc. ).

Grace aux efforts consentis au cours de ces dernières décennies, on dispose aujourd'hui de solutions qui permettent de concevoir et fabriquer ces fonctions analogiques et RF avec des performances intéressantes en termes de taille, consommation et fréquence de fonctionnement afin de réussir la transmission. C'est dans ce contexte, que nous avons mené une étude, qui vise la transmission analogique et numérique RF.

Le chapitre 1 rappelle les notions de bases de système de télécommunication Radio Fréquence (RF), il présente l'information d'un système de transmission et aussi la chaîne de système avec la définition de ses blocs.

Le chapitre 2 présente l'émetteur Radio Fréquence en simulant sous le logiciel ADS deux fonctions importantes à savoir : la modulation et le filtrage.

Le chapitre 3 présente une étude et simulation des amplificateurs de puissance ainsi que les amplificateurs à faible bruit LNA.

Le chapitre 4 développe sous le logiciel ADS un système de transmission complet. Une application wifi 2.4GHz est alors réalisée, et les résultats sont analysés et présentés.

# **Chapitre 1 :**

**Systemes de communications Radio  
fréquences (RF)**

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

## Chapitre1 : Système de communication Radio fréquence(RF)

### I.1. Introduction :

Le rôle des télécommunications est de transmettre des informations entre différents utilisateurs et de leur permettre de dialoguer. Ces informations peuvent provenir de sources ou capteurs de natures physiques variables, sous forme analogique ou numérique (voix, caméra vidéo, fichier électronique) et être transmises par le biais de supports de transmission divers, "bruités", et aux capacités limitées (air, lignes "métalliques", fibre optique) vers différents blocs de réception (haut-parleur, écran d'ordinateur ou de portable). Il faut alors adapter le signal initial au canal envisagé, afin de transmettre l'information le plus fidèlement possible tout en optimisant l'utilisation du canal [1].

### I.2. Un système de communication :

En télécommunication , un système de communication est un ensemble de différentes communications réseaux, transmission des systèmes, des relais stations, les stations tributaires, et les données des équipements terminaux ( ETTD )généralement capable d' interconnexion et interfonctionnement pour former un ensemble intégré [2].

#### I.2.1 Définition :

Un système de communication numérique est l'ensemble des moyens qui permettent la transmission des informations sous forme numérique d'une source vers un destinataire. Ces informations transmises peuvent être délivrées d'une manière numérique depuis la source (un ordinateur par exemple), ou être obtenues à partir d'une source analogique après discrétisation (parole, musique, image, . . .). De plusieurs flux d'information sont souvent présents dans les transmissions numériques. Le grand nombre de flux d'information simultanés est l'un des principales qualités de ce type de transmission. Considérons deux correspondants distants qui souhaitent échanger une information : des données, de la voix, des images, vidéo... etc. [3].



# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

## I.2.2 Une brève histoire des systèmes et réseaux de télécommunications :

L'histoire des télécommunications commence en 1794, quand Claude Chappe réalisa le premier système de [télégraphie](#) optique par sémaphore entre Paris et Lille. Ceux-ci demandaient des opérateurs habiles et des tours coûteuses espacées de dix à trente kilomètres, mais permettaient de transmettre les messages en quelques heures dans toute la France.

Il faudra attendre la fin du 19<sup>e</sup> siècle et la découverte de l'existence des ondes électromagnétiques par le physicien allemand Heinrich Hertz pour que se développe la transmission d'informations sans fil [4].

## I.2.3 Chaîne de transmission :

La chaîne de transmission la figure (1.1) peut se composer en trois blocs :

- + L'émetteur
- + Le milieu de transmission
- + Le récepteur

Pour transmettre l'information, l'émetteur a pour fonction d'associer au message numérique une grandeur physique en veillant à adapter celle-ci au milieu de transmission, le récepteur réalise l'opération inverse en reconstituant le message émis par la source à partir du signal reçu, le milieu de transmission représente le lieu Physique entre l'émetteur et le récepteur. [5]

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

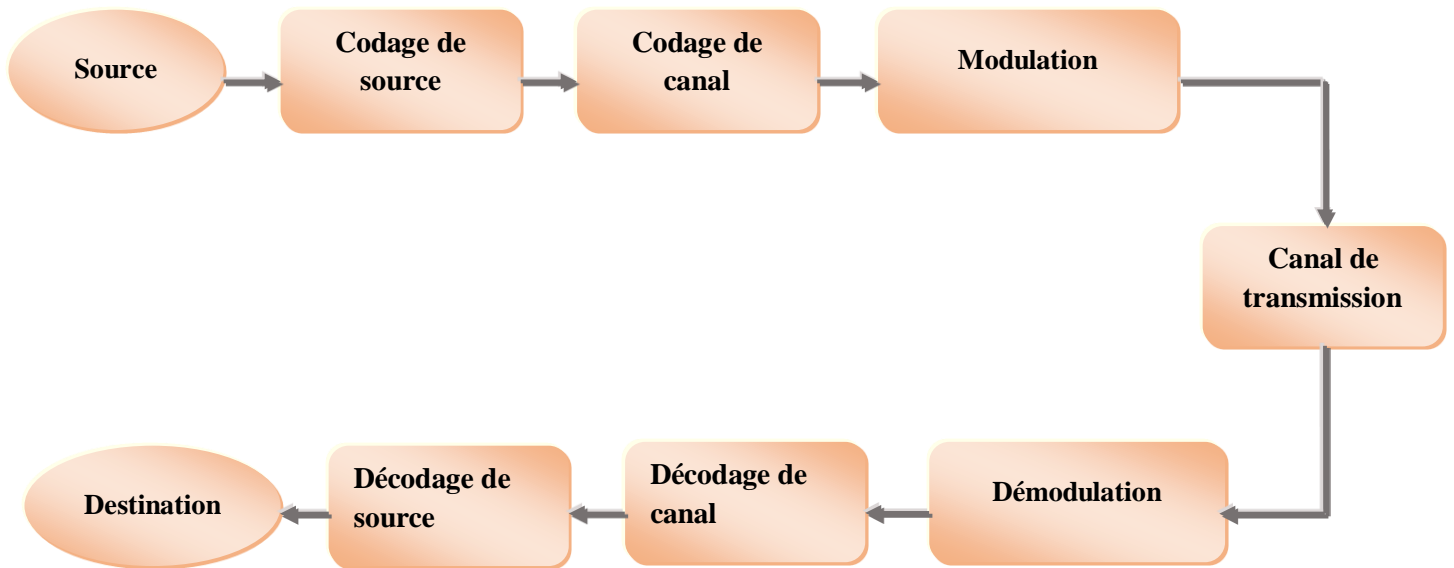


Figure I.1 : Chaîne de transmission

## I.2.3.1 La source :

Pour réaliser une transmission numérique, le message à transmettre doit être soit sous forme numérique ou bien analogique. Dans le cas analogique le message doit passer par trois blocs : échantillonnage (qui représente la numérisation dans le temps), la quantification (qui représente la numérisation d'amplitude) et le codage (qui donne à chaque échantillon une suite binaire) [6].

## I.2.3.2 Codage source :

La séquence transmise par la source doit être la plus courte possible pour augmenter le débit de transmission nécessaire et optimiser l'utilisation des ressources du système. Le codeur de source a pour objectif de compresser les données en éliminant les éléments binaires non significatifs. Le principe du codage de Source a été publié par Shannon [7].

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

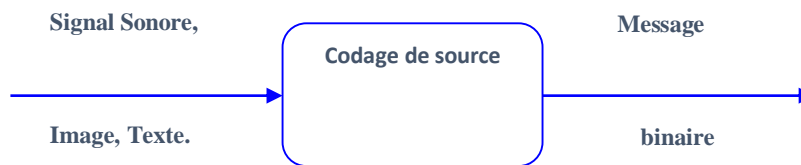


Figure I.2 : le codage de source

## I.2.3.3 Codage canal :

Lors du passage à travers le canal de transmission, le signal est soumis à divers interférences, introduisant des erreurs en réception. Afin d'augmenter la fiabilité de la transmission, un codage de canal introduit de la redondance dans la séquence d'information. Le récepteur connaît la loi de codage utilisée et est donc capable de détecter et corriger les données binaires erronées [8].

## I.2.3.4 La modulation :

La modulation s'appelle M-aire consiste à associer à chaque mot de  $n$  éléments binaire un signal ( $t$ ). Le message binaire  $D$  est donc représenté par un signal, on définit alors la rapidité de modulation  $R$  sous forme :  $R=D/\log_2$  [5].

## I.2.3.5 Canal de transmission :

Le principe d'une transmission est de se faire à distance ; il faut utiliser un milieu physique qui assure le lien entre la source et le destinataire et aussi un signal approprié au milieu choisi pour qu'il s'y propage correctement. Selon son contexte, le terme de canal de transmission possède des significations différentes :

- ✚ Au sens de la propagation, le canal de transmission est la portion du milieu physique utilisée pour la transmission spécifique étudiée ; c'est le milieu de transmission tel que le câble coaxial, l'air, la fibre optique...etc...

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

- ✚ Au sens de la théorie des communications, le canal de transmission peut inclure : le milieu de transmission, le bruit, et éventuellement le filtre d'émission placé physiquement dans l'émetteur tel que le canal binaire symétrique, le canal gaussien, et le canal de Rayleigh....etc... [6]

## I.2.3.6 Récepteur :

A pour objectif de reconstituer au mieux, le message émis à partir du signal reçu. Il comprend des circuits d'amplification de changement de fréquence de démodulation et d'échantillonnage. Enfin, un dispositif de décision : identifie la valeur des symboles binaires transmis [9].

## I.3. Système radio fréquence (RF) :

### 1.3.1 Définition :

L'objectif d'un système de télécommunication est de transmettre un message (Enveloppe) sur de longues distances, et ce, au travers d'un milieu (Canal de propagation) pouvant être un support solide (câble, fibre...) ou libre (transmissions sans fil — Figure I.3).

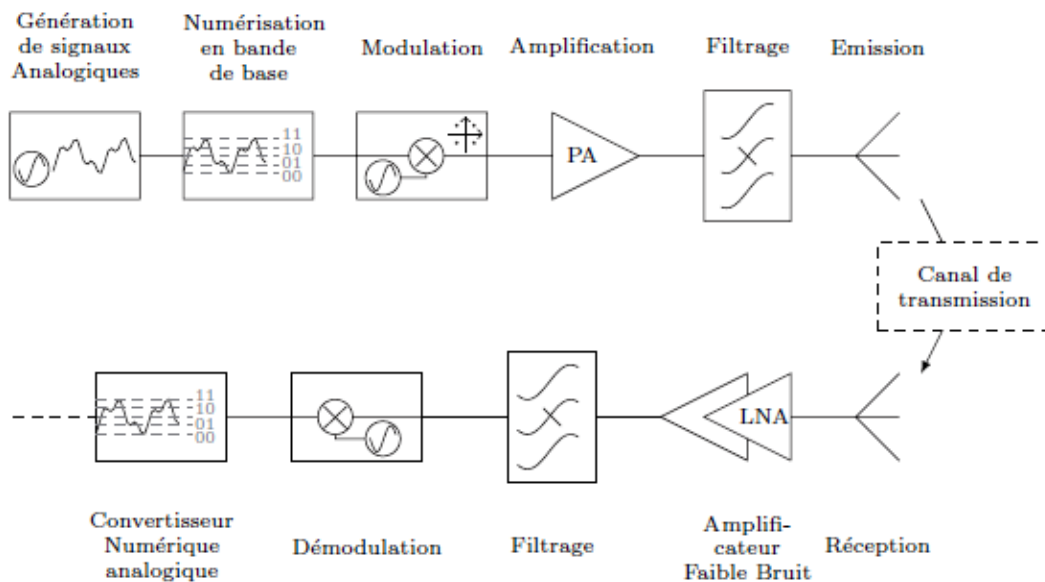


Figure I.3 : Synoptique d'une chaîne de transmission RF.

La longueur du canal de transmission et l'atténuation linéique qu'il impose au signal à transmettre ne permet généralement pas la transmission d'une (ou plusieurs) enveloppe sous

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

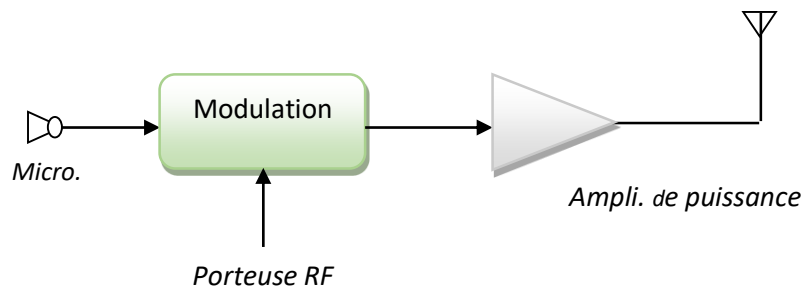
sa forme originale (en bande de base). Les transmissions hertziennes se basent donc sur une transposition des signaux à transmettre vers les hautes fréquences. Ainsi, l'impact du canal et les différentes parties de la chaîne de transmission sont limitées [10].

La partie RF (ou Front End RF) traite des signaux analogiques (et ce même si la modulation utilisée est dite numérique) à des fréquences élevées, leur spectre n'est pas centré sur zéro ; par opposition avec la bande de base qui traite des signaux BF (base fréquence) ayant un spectre centré sur, ou proche de, l'origine. La bande de fréquence RF s'étend de quelques centaines de kHz à quelques GHz [11].

## I.3.2 Architecteur d'un système radio fréquence : [11]

### I.3.2.1 Architecture analogique :

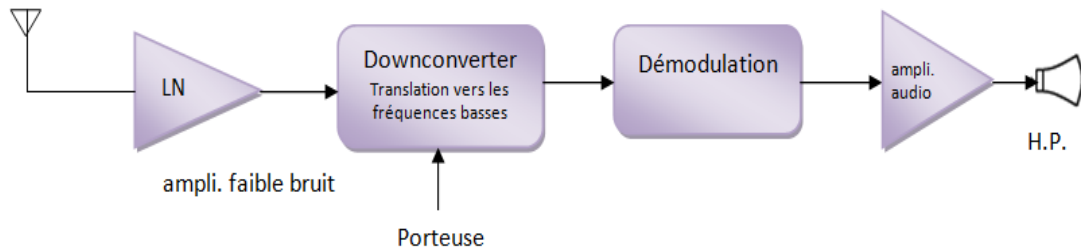
Un émetteur – récepteur RF comporte un émetteur (ou transmitter) aussi appelé chaîne Tx (figure I.4). Très schématiquement, le signal issu d'un micro est modulé et translaté à la fréquence d'une porteuse RF, puis amplifié avant d'attaquer l'antenne.



**Figure 1.4 : Emetteur RF analogique**

Il comporte également un récepteur (ou receiver) parfois appelé chaîne Rx (figure I.5).

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)



**Figure 1.5 : Récepteur RF analogique.**

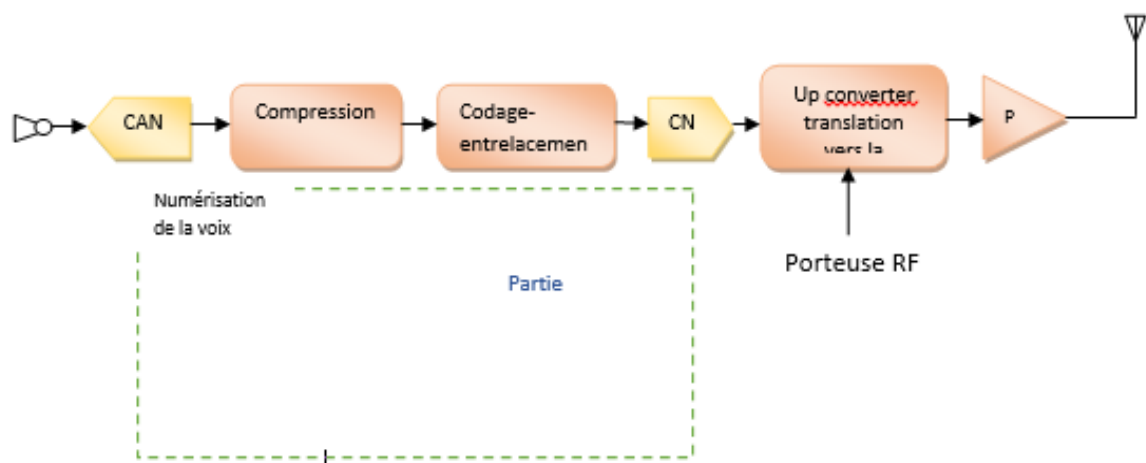
Le signal RF capté par l'antenne est amplifié par un amplificateur faible bruit, traduit vers la bande de base par le "downconverter", puis démodulé et amplifié avant d'attaquer un haut-parleur.

La contraction de "transmitter" et de "receiver" donne le terme "transceiver" utilisé pour désigner un émetteur – récepteur.

L'architecture des transceiver analogiques comporte peu de composants, ils sont "relativement simples" à concevoir.

## I.3.2.2 Architecture numérique :

Un transceiver RF numérique transmet un signal RF analogique modulé numériquement. Il est constitué d'une partie émettrice (figure I.6) et d'une partie réceptrice (figure I.7). Elles comportent toutes deux une partie numérique importante.



**Figure I.6 : Emetteur RF numérique**

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

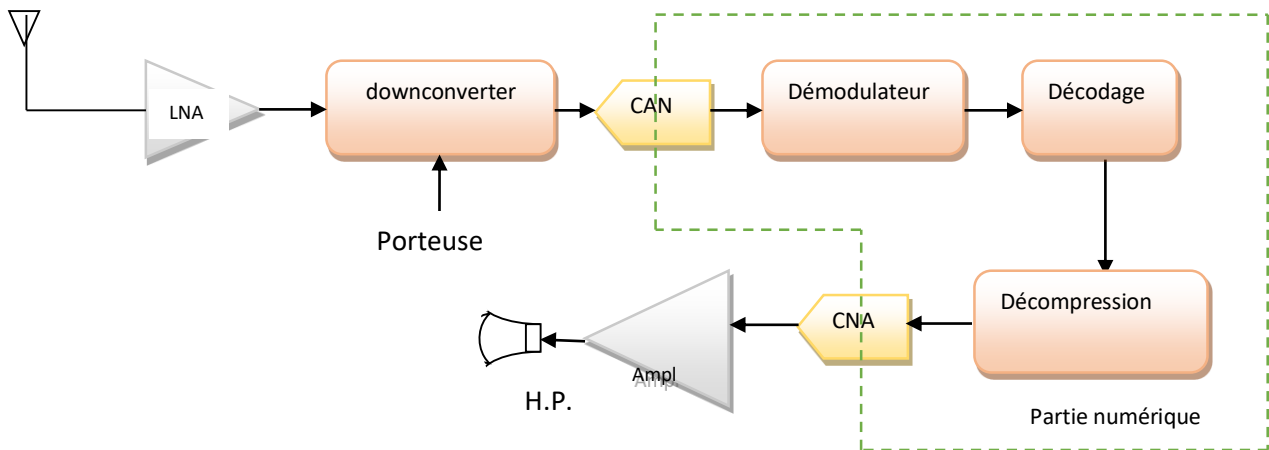


Figure I.7 : récepteur RF numérique

A première vue l'architecture d'un transceiver RF numérique semble bien plus complexe, c'est effectivement le cas.

Cependant les techniques de traitement numérique du signal mises en œuvre (codage, entrelacement, compression, etc.) permettent de minimiser les erreurs de transmission (elles sont mesurées par le BER ou Bit Error Rate, c'est-à-dire le taux d'erreur binaire) et de réduire la bande passante de la transmission en réduisant le débit des informations à transmettre (le bit rate). Hors, le spectre de fréquence disponible est limité, d'où l'intérêt d'en limiter la partie dévolue à chacun des utilisateurs (ce que permet l'approche numérique).

Le design d'un transceiver numérique est conceptuellement plus complexe, cependant, les avantages cités précédemment (parmi d'autres) ont fait que l'approche numérique s'est imposée.

## I.4. Emetteur-Récepteur RF :

### I.4.1 Emetteur RF :

#### I.4.1.1 Emetteur de type hétérodyne : [12]

Un émetteur hétérodyne, représenté en (Figure 1.8) fait une double conversion de fréquence. La première partie permet la translation du signal de la bande de base vers une fréquence intermédiaire  $f_{if}$ . Puis, dans une seconde partie, le signal est transposé vers la

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

fréquence RF souhaitée à l'aide d'un simple mélangeur et d'un deuxième oscillateur local fonctionnant à la fréquence  $f_{i0} = f_{rf} - f_{if}$ .

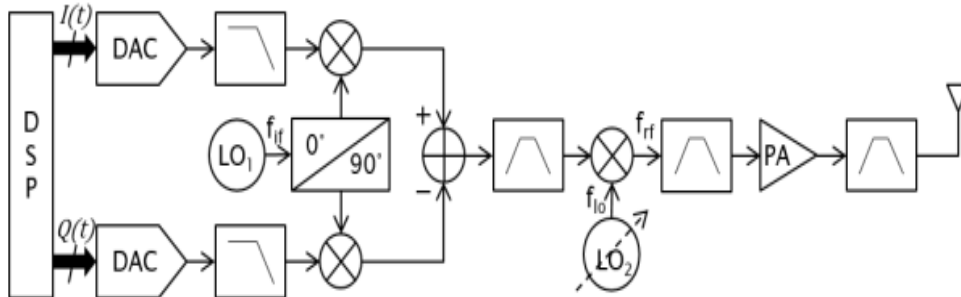


figure I.8 : Émetteur hétérodyne

Un filtre passe-bande est nécessaire entre le modulateur I/Q et le mélangeur simple pour atténuer les harmoniques de la fréquence intermédiaire et ainsi éviter l'apparition de la fréquence image à  $f_{i0} - f_{if}$ , qui peut se mélanger à la fréquence du deuxième oscillateur.

## I.4.1.2 Émetteur à conversion directe ou homodyne : [13]

Dans les émetteurs homodynes, un seul étage de conversion en fréquence est présent comme illustré sur la (Figure I.9).

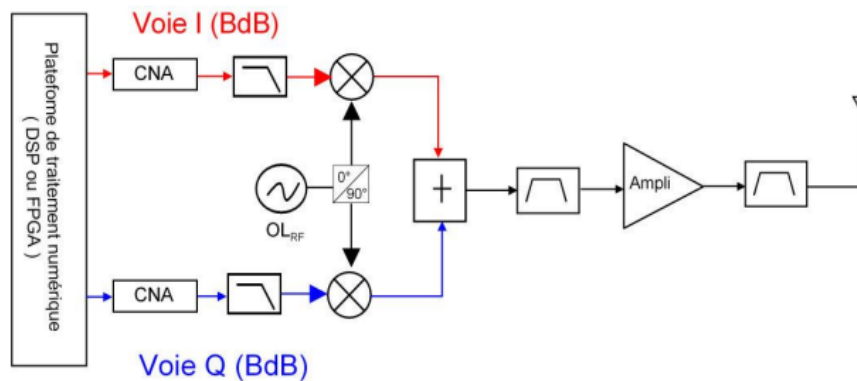


Figure 1.9 : Synthétique d'un émetteur à conversion directe

Le signal bande de base est directement modulé à la fréquence RF d'émission sans passer par une fréquence intermédiaire FI. Cette architecture, aussi appelée architecture zéro-FI en raison de l'absence de fréquence intermédiaire, est très compacte (peu de composants) et peut être



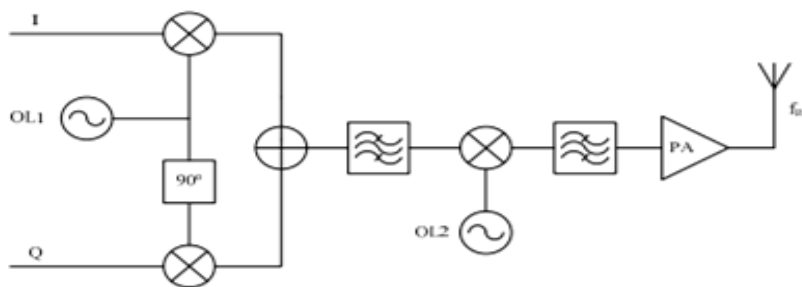
# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

facilement intégrée. Elle convient aux applications de type WCDMA où la surface et la consommation de courant sont des critères déterminants.

## I.4.1.3 Emetteurs à fréquence intermédiaire :[14]

Une autre solution afin d'éviter le problème de « pulling » consiste à séparer la fréquence d'émission et de modulation en introduisant une fréquence intermédiaire.



**Figure I.10 : Emetteur à fréquence intermédiaire.**

Dans un premier temps, comme le montre (la Figure 1.10), les signaux en bande de base sont modulés et transposés à une fréquence intermédiaire. Le signal obtenu est alors filtré afin d'éliminer les harmoniques puis transposé à la fréquence de la porteuse par un second mélange. Le signal de sortie est ensuite filtré pour éliminer la fréquence image créée par le mélange. Cette Composante étant à la même puissance que la composante utile, le filtre utilisé doit être efficace, impliquant un fort coefficient de qualité et donc une difficulté d'intégration.

## I.4.2 Récepteur RF :

Un système de radiocommunication utilise les propriétés de propagation des ondes radiofréquences (RF) pour transmettre une information. La fréquence du signal contenant l'information est donc convertie en haute fréquence (up-conversion) à l'émission. A la réception, il est alors nécessaire d'abaisser la fréquence du signal reçu pour passer d'une fréquence RF à une fréquence intermédiaire (IF) plus faible (down-conversion) afin de faciliter le traitement devant aboutir à l'extraction de l'information. Les catégories de récepteurs sont distinguées suivant la façon dont cet abaissement de fréquence est réalisé. Si la fréquence

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

intermédiaire résultante n'est pas nulle, on parle de récepteur hétérodyne. Dans le cas contraire, on parle de conversion directe. D'un point de vue analogique, dès que cette « down-conversion » n'est pas réalisée vers la fréquence nulle, le problème des fréquences négatives (ou fréquences images) apparaît. Dans ces conditions, différentes fréquences RF peuvent être converties à la même fréquence IF que la fréquence utile. Les signaux à ces fréquences ne contenant aucune information, ils constituent du bruit et leur conversion dégrade la qualité du signal utile. L'optimisation des performances de la liaison nécessite donc que le récepteur soit à réjection d'image. [15]

## I.4.2.1 Récepteur hétérodyne : [16]

Un récepteur doit être capable :

- ✚ D'amplifier les signaux modulés (de faible niveau, en raison de la distance séparant l'émetteur du récepteur)
- ✚ De sélectionner le canal désiré dans la bande d'intérêt
- ✚ De démoduler la porteuse correspondante et de restituer le message transmis.

Ces opérations doivent s'effectuer en présence de bruit et l'on ne doit pas oublier que l'antenne captera une multitude d'émissions dans les bandes de fréquences environnantes.

Le principe de la réception hétérodyne repose sur un changement de fréquence consistant à transposer le spectre d'un signal Radio Fréquence (RF) capté par l'antenne autour d'une fréquence fixe appelée Fréquence Intermédiaire (FI, généralement beaucoup plus basse que celle de la porteuse RF). Ce changement de fréquence est réalisé à l'aide d'un mélangeur et d'un oscillateur local. Intérêt du changement de fréquence (hétérodyne) :

- ✚ Elimine le besoin de réaliser un filtre sélectif en haute fréquence de fréquence centrale variable (pour assurer la sélection d'un seul canal)
- ✚ Le démodulateur fonctionne à fréquence porteuse fixe
- ✚ L'ampli FI fonctionne à fréquence fixe et peu élevée, ce qui permet d'avoir un gain important.

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

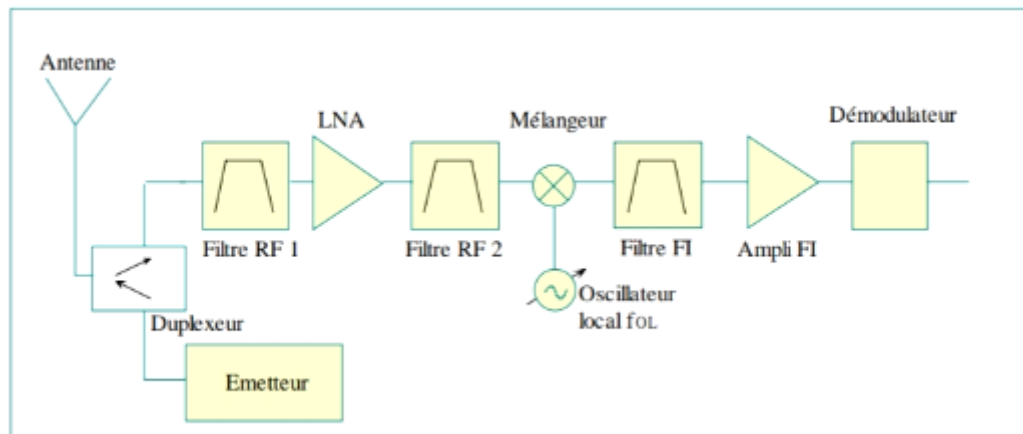


Figure I.11 : Principe de Récepteur hétérodyne

Tous les récepteurs radio et TV du commerce font usage de ce principe. On retrouve cette structure dans les analyseurs de spectre à balayage, ainsi que dans les analyseurs de réseau.

## I.4.2.2 Récepteur à conversion directe : [15]

Considérons maintenant la structure à conversion directe, encore appelée structure homodyne. En mettant en œuvre une fréquence de l'oscillateur local égale à celle de la fréquence porteuse RF, la fréquence intermédiaire devient alors nulle. La complexité du filtrage nécessaire à la sélection du canal est dans ces conditions bien réduite. Cependant, la portion du canal translatée dans les fréquences négatives devient l'image de l'autre partie du canal qui est-elle translatée dans les fréquences positives. Un traitement complexe est nécessaire pour reconstituer le signal. Sans ce traitement, il y aurait repliement des fréquences négatives sur les fréquences positives. L'architecture utilisant une telle conversion est décrite sur (la Figure 1.12).

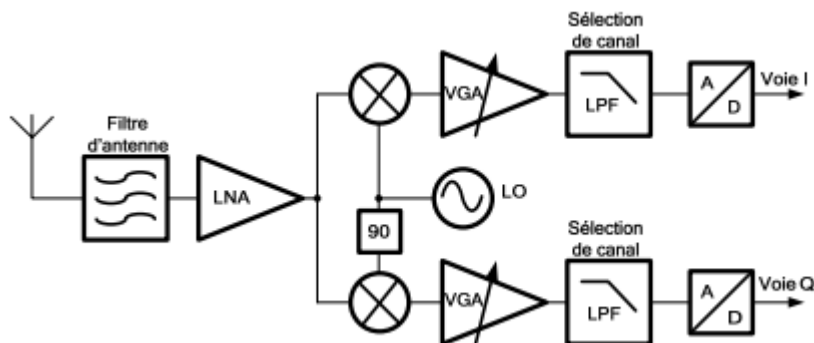


Figure 1.12: Récepteur homodyne

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

En raison de la valeur nulle de la fréquence intermédiaire, la sélection du canal peut être réalisée par un unique et simple filtre passe bas. De plus, cette structure n'utilise qu'un seul oscillateur local et la réjection d'image entre le LNA et le mélangeur n'est plus nécessaire, ce qui permet encore la suppression d'un filtre. De ce qui précède, nous pouvons conclure que cette structure est beaucoup plus simple que celle de l'architecture hétérodyne et qu'elle possède un très fort niveau d'intégration, en ne nécessitant que peu de composants externes. De plus contrairement à l'architecture hétérodyne, elle peut être très large bande.

## I.4.2.3 Récepteurs à faible fréquence intermédiaire : [14]

Le récepteur à faible fréquence intermédiaire consiste à transposer le signal reçu autour d'une fréquence intermédiaire très faible. Cette transposition à une faible fréquence intermédiaire permet d'éliminer le nombre d'éléments fonctionnant dans le domaine des radiofréquences tout en évitant la génération de tensions continues parasites car le signal résultant du premier mélange n'est pas directement transposé en bande de base.

Le récepteur à faible fréquence intermédiaire transpose donc le signal reçu à une fréquence proche de la bande de base. Le signal peut ensuite être démodulé soit par un démodulateur numérique comme le montre la Figure 1.13, soit en réalisant une nouvelle transposition du signal vers la bande de base.

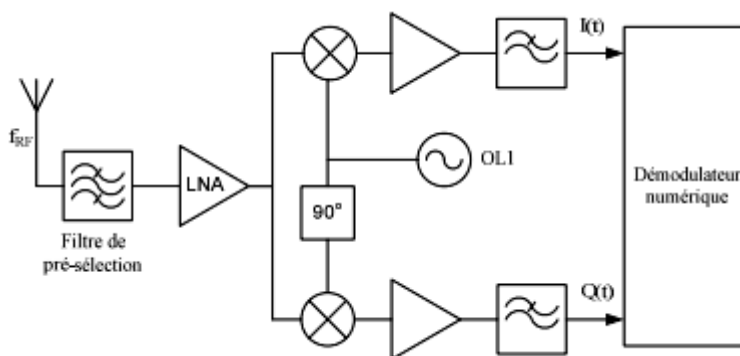


Figure I.13 : Récepteur à faible FI.

## I.5. Génération du signal RF par détection hétérodyne :

Pour générer un signal RF, la plupart des techniques reposent sur le principe de cohérence de mélange dans la photodiode. Ces techniques sont généralement désignées par le terme « Détection Hétérodyne (RHD) ».

# Chapitre 1 : Systèmes de communications Radio fréquences (RF)

---

L'utilisation de l'hétérodynage optique permet la génération de très hautes fréquences. En outre, cette technique conduit à un bon rapport de puissance détecté et de rapport signal sur bruit (CNR) étant donné que les deux champs optiques contribuent à la puissance RF générée.

La détection hétérodyne a un avantage par rapport à la dispersion chromatique. Si une seule des deux porteuses optiques est modulée par les données, la sensibilité du système à la dispersion chromatique peut être réduite considérablement. Réduire les effets de la dispersion chromatique est très important afin de diminuer le bruit de phase pour les formats de modulation tels que xQAM, où la dispersion entraîne une grande perte de puissance.

Parmi les autres avantages de la RHD on peut citer le traitement photonique du signal radio tels que le contrôle de phase, le filtrage et la conversion de fréquence.

L'inconvénient majeur de la RHD est la forte influence du bruit de phase du laser et l'influence de la variation de fréquence sur la stabilité de signal RF généré, et puisque les lasers à semi-conducteurs ont de grandes largeurs spectrales, des mesures supplémentaires doivent être prises pour réduire la raie de la génération de signaux RF. Ces mesures conduisent souvent à des systèmes plus complexes [17].

# **Chapitre 2 :**

**Modulation et filtrage dans une chaîne  
de transmission**

# **Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF**

---

## **Chapitre2 : Modulation et filtrage dans une chaîne de transmission**

### **II.1 Introduction :**

Le développement des systèmes de communication modernes conduit aujourd'hui à une évolution importante dans les domaines de l'électronique RF et microonde. Cette évolution est liée à plusieurs exigences telles que l'intégration, le coût et la fiabilité des circuits. [18]

Dans ce chapitre on va voir le rôle de la modulation et le filtrage dans une chaîne de transmission RF avec leur simulation sous ADS.

### **II.2 La modulation :**

#### **II.2.1 Définition de la modulation**

La modulation est un processus d'encodage de l'information à partir d'une source d'une manière convenant à la transmission. Il implique de traduire un signal de message de bande de base à un signal de bande passante. Le signal de bande de base s'appelle le signal de modulant et le signal après modulation s'appelle le signal modulé.

La modulation peut être faite en modifiant certaines caractéristiques des ondes porteuses selon le signal de message.

Le dispositif qui effectue cette modulation, en général électronique, est un modulateur. L'opération inverse permettant d'extraire le signal de la porteuse est la démodulation [19].

#### **II.2.2 Les différentes modulations**

##### **II.2.2.1 Modulation d'amplitude**

La modulation d'amplitude est la modulation dont le traitement est le plus aisé. D'ailleurs les premières émissions radio étaient faites en modulation radio et les premiers détecteurs étaient les postes à galène [2]. Elle consiste à multiplier un signal RF, la porteuse, par un signal contenant l'information, le signal modulant. Le principal inconvénient de cette modulation est le mauvais rapport signal à bruit qu'elle offre, notamment comparée à la modulation de fréquence.

La modulation d'amplitude est particulièrement adaptée aux solutions de réception passives ou semi-passive. Dans ce cas le récepteur offre des performances en consommation remarquables. Cependant l'énergie économisée par la partie réceptrice est alors consommée par la partie émettrice.

# **Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF**

---

Pour les solutions de réception active deux types de démodulation peuvent être mises en oeuvre. La chaîne à détection directe, la plus simple, pour laquelle aucun changement de fréquence n'est opéré et celle plus complexe, où la détection est opérée à une fréquence intermédiaire. Dans le premier cas, l'amplification du signal RF est le poste le plus important en consommation. La majeure partie de l'énergie lui est alors dédiée. Dans le second cas, c'est la génération de la fréquence intermédiaire qui est l'élément le plus consommant [20].

## **II.2.2.2 Modulation en fréquence**

La modulation en fréquence est délicate à mettre en oeuvre dans le cadre des récepteurs d'activation car la gestion d'une horloge de référence sans utiliser de composants externes et actifs est difficilement envisageable. Par ailleurs, l'architecture de la chaîne est complexe et peu compatible avec les objectifs de basse consommation. Cependant, bien que peu répandue cette solution n'est pas délaissée, un compromis peut être envisagé entre le surplus de consommation et le gain en sensibilité comparée à la modulation d'amplitude [20].

## **II.2.2. 3 Modulation en phase**

La dernière caractéristique du signal qui peut être modulée est la phase. Ce type de modulation est notamment utilisée pour les télécommunications tel que le WiFi, le GSM. La démodulation d'un signal modulé en phase fait intervenir une architecture complexe composée de mélangeurs, de déphaseurs et d'oscillateurs. L'une des architectures types utilisées pour les récepteurs concernés par cette modulation est la boucle de Costas. De par sa complexité, elle n'est pas appropriée pour les circuits à basse consommation [20].

La figure 2.1 représente les différents types de modulation.



## Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

---

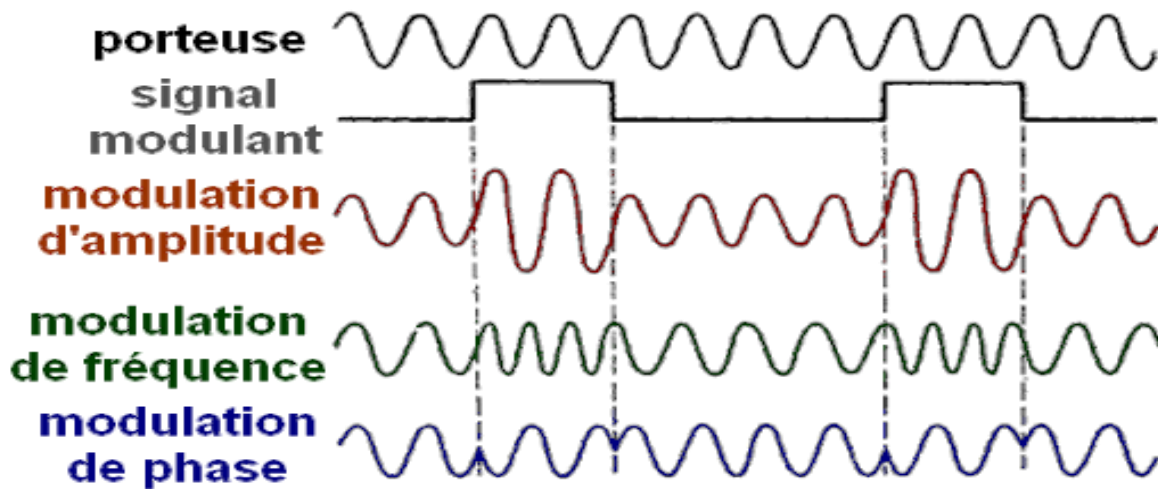


Figure II.1: les différents types de modulation

### II.2.3 Les intérêts de modulation [19]

- ✚ **Facilite l'accès multiple** : en traduisant le spectre en bande de base des signaux provenant de différents utilisateurs pour différentes bandes de fréquence, de multiples utilisateurs peuvent être logés à l'intérieur d'une bande du spectre électromagnétique.
- ✚ **Augmente la portée de communication** : les signaux en bande de base de basse fréquence souffrent de l'atténuation, et ne peuvent donc pas être transmis sur de longues distances. La conversion à une bande de fréquence plus élevée se traduit par une longue distance de transmission.
- ✚ **Réduction de la taille de l'antenne** : La hauteur de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence du signal rayonné et donc le rayonnement du signal haut fréquence diminue la taille de l'antenne.

### II.2.4 Génération d'un signal RF modulé :

Le but de cette application est de prendre en main le logiciel de CAO en concevant et en analysant un système simple. Pour cela nous avons généré un signal RF avec une modulation  $\pi/4$ DQPSK. Le système sera composé d'une source en fréquence, d'une source de donnée binaire pseudo aléatoire, d'un modulateur et enfin d'un filtre [21].

# Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

## II.2.4.1 Etude de la source temporelle :

Dans un premier temps, vérifiez les données générées par la source pseudo aléatoire. Pour cela il est nécessaire d'effectuer une simulation dans le domaine temporel, comme le montre la figure suivante.

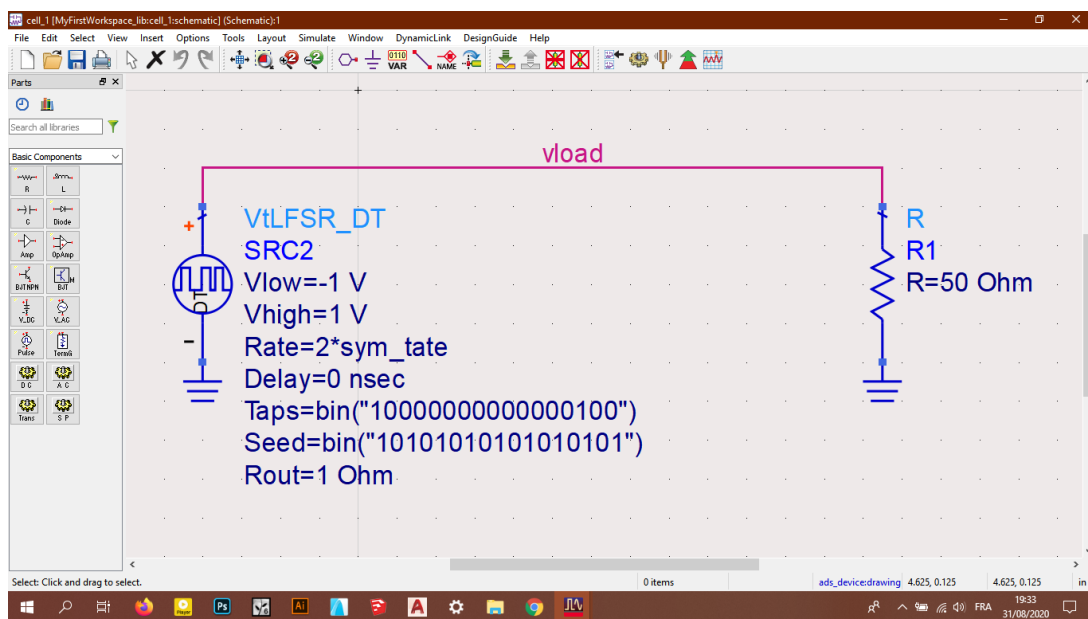


Figure II.2: schématique de la simulation d'une source temporelle.

Pour tracer Vload en fonction du temps (vs sous ADS), nous ouvrons une fenêtre « display ». Nous utilisons les marqueurs pour calculer le débit. Et nous vérifions que la séquence générée correspond bien à celle définie dans le modèle utilisé dans la « schématique » (débit, séquence...). Nous avons obtenu les résultats présentés sur la figure 2.3.

## Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

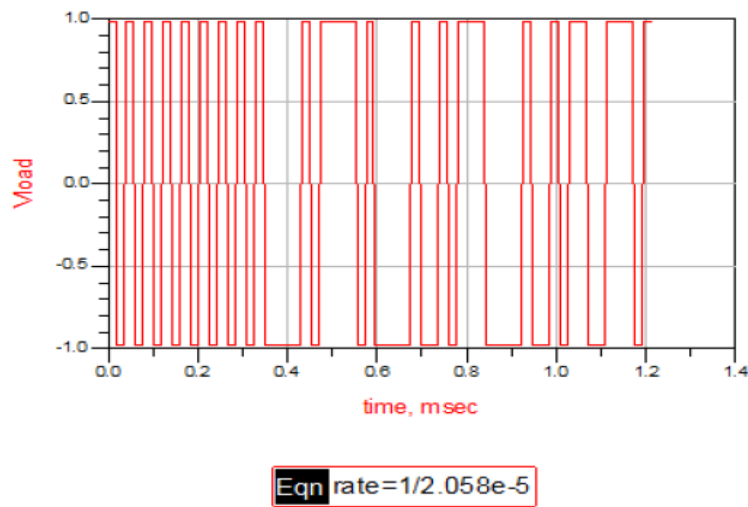



Figure II.2: Résultat de la simulation d'une source temporelle

Pour visualiser les calculs dans un tableau, nous cliquons sur l'icône  qui se trouve sur la barre des tâches à gauche de la fenêtre « display » et dans le menu « data set et équation », nous sélectionnons équation. La liste des équations de notre fenêtre « display » apparaît alors dans le cadre, et nous sélectionnons celles dont nous voulons visualiser le résultat dans le tableau 2.1.

Eqn rate=1/2.058e-5

rate
48590.865

Tableau 2.1 Tableau de résultat de la simulation temporelle.

### II.2.4.2 Etude de la source fréquentielle

Pour cela on doit désactiver la source de données binaires et connecte la source fréquentielle, et choisir le simulateur harmonique balance (voir annexe), et vérifiez que la source émet bien une puissance de 10dBm à 800MHz.

# Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

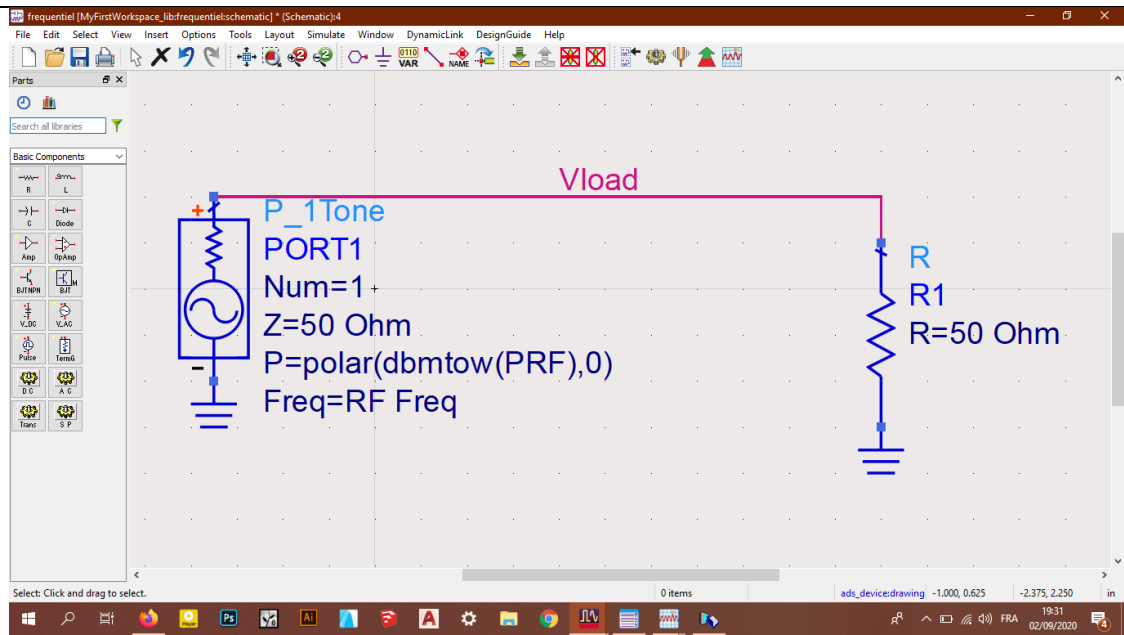


Figure II.3: Schématique d'une source fréquentielle

## II.2.4.3 Etude du signal modulé :

Dans cette étape on doit placer un modulateur DQPSK et en utilisant le simulateur d'enveloppe :

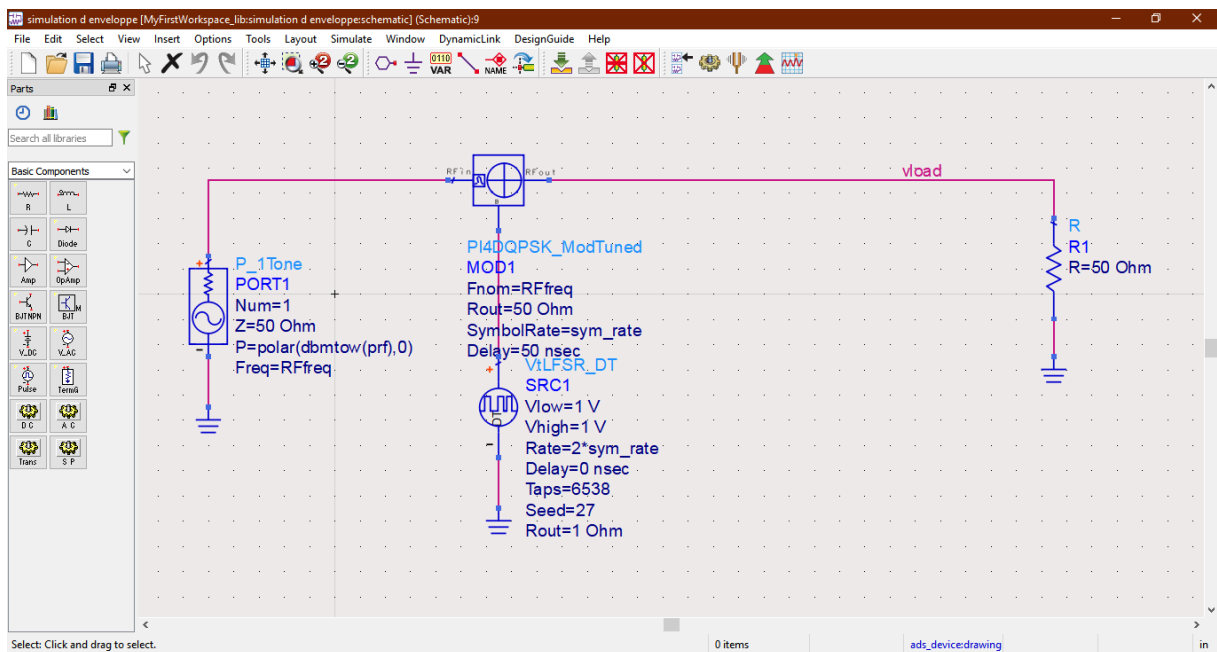


Figure II.4: schématique de la simulation d'enveloppe.

# Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

On simule le système, dans la fenêtre display data on visualise le spectre d'enveloppe, Pour cela nous utilisons l'éditeur d'équation comme indiqués ci-dessous tout en respectant la syntaxe pour utiliser les variables (majuscules et minuscules).

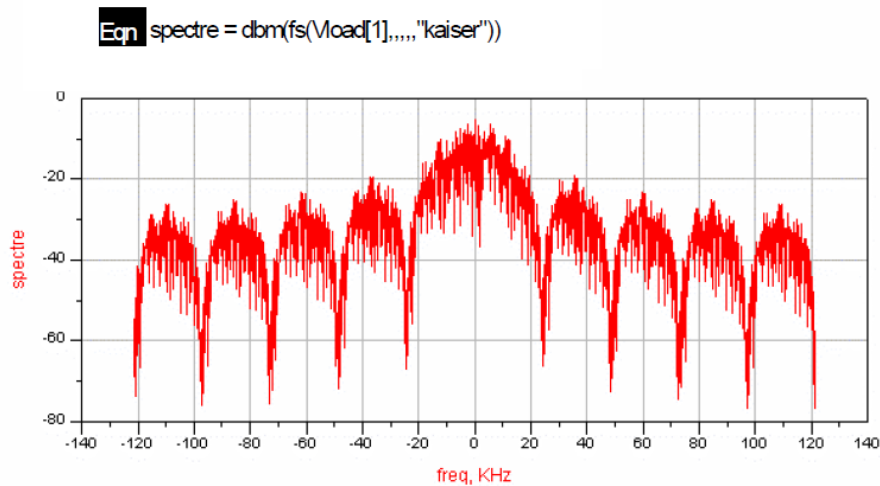


Figure II.5: Spectre sans filtre

La Figure 2.6 présente le spectre du signal sans filtrage. L'effet du bruit sera supprimé en utilisant un filtre passe bande.

## II.3 Filtrage

### II.3.1 Filtrage des sources modulées [22]

Le filtrage permet de réduire significativement la largeur de bande de transmission sans perdre le contenu des données numériques. Pour cela, il adoucit les transitions rapides d'amplitude, de phase ou de fréquence d'un signal. Un des principaux avantages est qu'il réduit l'interférence entre canaux dans un système à multiplexage fréquentiel. Cependant, le filtrage peut créer des pics de puissance, de l'interférence entre symboles, et rend les systèmes radios plus complexes et plus gros (surtout lorsqu'ils sont conçus analogiquement). Il faut donc l'utiliser à bon escient.

Il y a de nombreuses variétés de filtrage. Les plus courantes sont :

- ✚ Le filtrage SRRC (Square Root Raised Cosine)
- ✚ Le filtrage RC (Raised Cosine)
- ✚ Le filtrage gaussien

## Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

### II.3.2 Rôle des filtres RF dans les chaînes de télécommunication

Une chaîne d'émission-réception de type superhétérodyne peut être représentée d'une manière générale par le synoptique de la Figure 2.7. L'antenne permet la réception des signaux, le commutateur permet de commuter entre le canal émission et réception. Dans le canal de réception le filtre RX-RF permet la sélection de la bande de réception, l'amplificateur faible bruit « LNA » amplifie le signal utile et préserve le système du bruit. Le filtre RX-IF placé derrière le mélangeur effectue un filtrage à la fréquence intermédiaire avant la conversion en bande de base. Dans l'émission, ces filtres sont essentiellement responsables de la mise en forme du signal fourni à l'amplificateur de puissance[18].

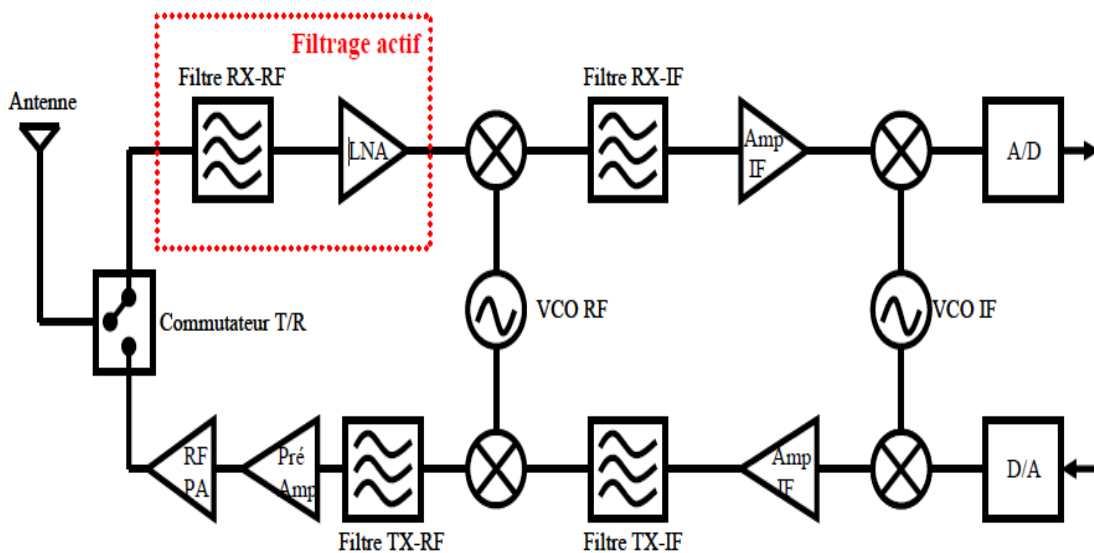


Figure II.7 Architecture superhétérodyne d'une chaîne d'émission-réception

Dans le contexte des applications de télécommunications sans fil multi standards, les filtres RF exigent des performances en termes de sélectivité, de linéarité et de consommation très élevées. L'intégration de ces filtres RF à hautes performances est un enjeu industriel important.

Actuellement, les filtres passifs non intégrables, tels que les filtres à cavités, à guides d'ondes céramiques et les filtres SAW (Surface Acoustic Wave) sont très largement utilisés. Ces filtres offrent de très bonnes performances, mais leurs dimensions encombrantes et leurs

## Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaîne de transmission RF

pertes d'insertion représentent un inconvénient majeur. De plus, ils sont difficilement accordables en fréquence.

Dans ces conditions, les filtres actifs représentent une alternative intéressante vu leur facilité d'intégration et la possibilité d'être accordables en fréquence. Malheureusement, l'utilisation de ces filtres impose la prise en compte des nouveaux paramètres tels que :

- ✚ la stabilité,
- ✚ les performances en bruit,
- ✚ la linéarité,
- ✚ la consommation.

### 2.3.3 Emplacement d'un filtre passe bande

Pour faire une modification de la simulation précédente on doit placer maintenant un filtre passe-bande dans le circuit relié avec la charge R par un fil Vload et relié aussi avec le modulateur DQPSK (figure 2.8). Après la simulation, nous obtenons le résultat de la figure 2.9. Le filtre a rejeté les fréquences non désirées tout en permettant la transmission d'une fréquence utile.

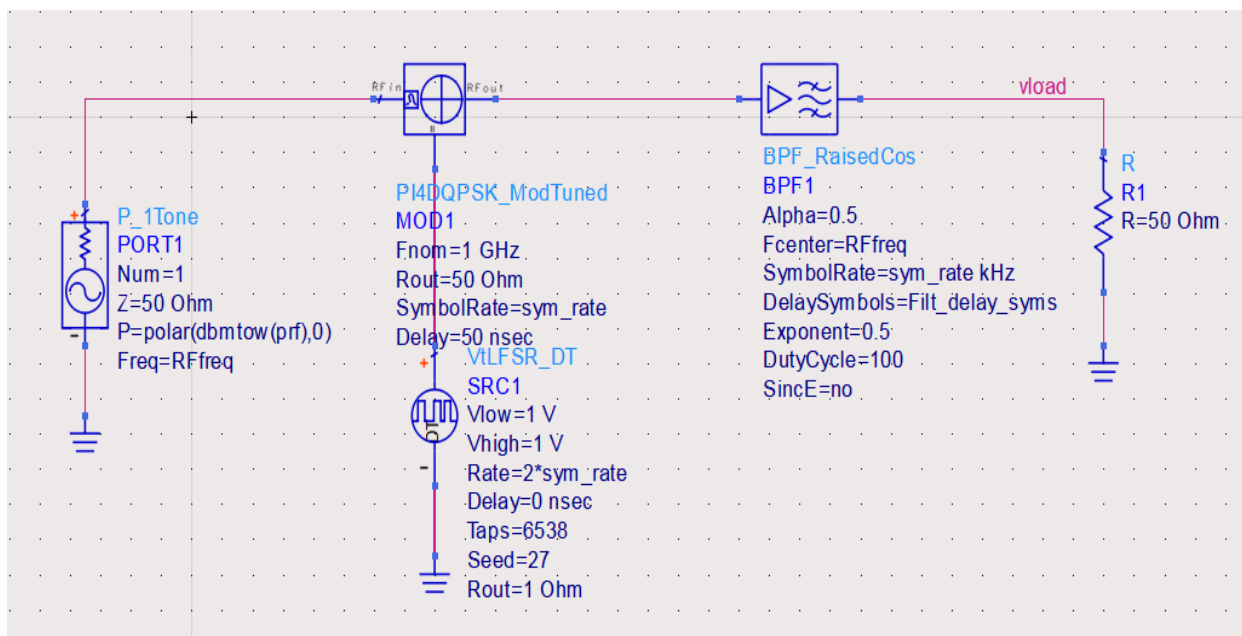


Figure II.8 Schématique de la simulation d'enveloppe avec le filtre.

## Chapitre 2 : Modulation et Filtrage dans une chaine de transmission RF

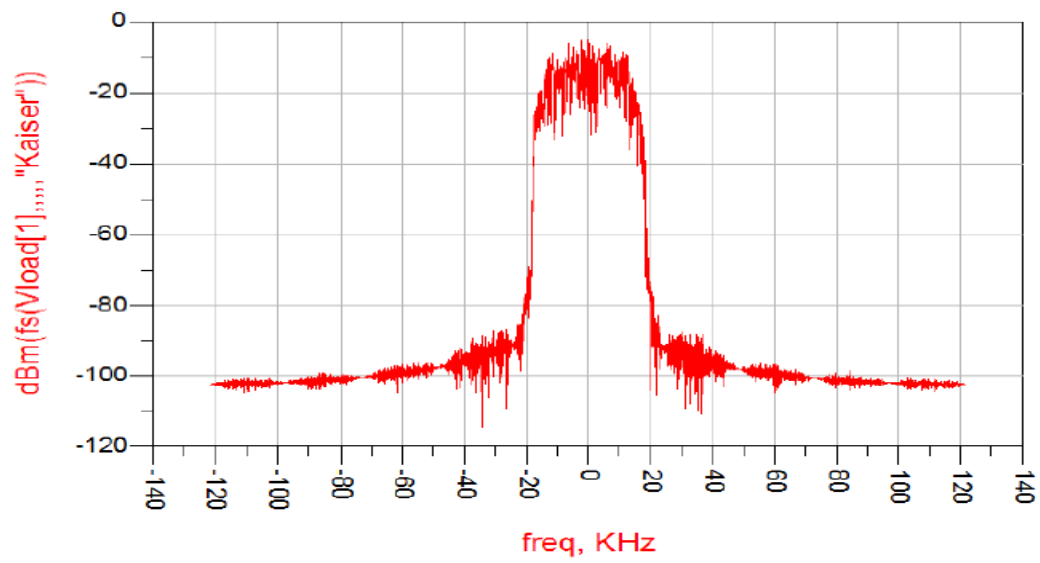


Figure II.9 Spectre du signal modulé après filtrage.



# **Chapitre 3 :**

**Amplificateurs de Puissances et  
Amplificateurs à faible bruit**

# **Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit**

---

## **Chapitre3 : Amplificateurs de Puissances et Amplificateurs à faible bruit**

### **III.1 Introduction :**

Les amplificateurs radioélectriques sont conçus pour amplifier les signaux générant des ondes radio. Ils sont souvent spécialement étudiés pour alimenter une antenne radioélectrique : pour les émetteurs, ce sont les amplificateurs RF de puissance, et pour les récepteurs, ce sont les amplificateurs faible bruit.

Ces travaux de chapitre se focalisent sur la fonction d'amplification de puissance et l'Amplification à faible bruit.

### **III.2 Les amplificateurs de puissance pour les communications RF**

#### **III.2.1 Définition d'un amplificateur de puissance :**

L'amplificateur de puissance est le dernier étage d'une chaîne amplificatrice. Il permet de fournir une puissance beaucoup plus grande que celle fournie par le signal de commande, tout en gardant

la même forme du signal. La finalité des amplificateurs est la commande d'un actionneur (haut-parleur, moteur, inductance, résistance...) sans déformation du signal appliqué en entrée [23].

Le transistor microonde est le cœur de l'amplificateur de puissance. Cette cellule active réalise la fonction de conversion d'énergie continue DC vers une puissance RF. La Figure III.1 présente le schéma bloc d'un amplificateur de puissance RF ainsi que le modèle équivalent simplifié du transistor de puissance agissant comme une source de courant non-linéaire contrôlée en tension [24].

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

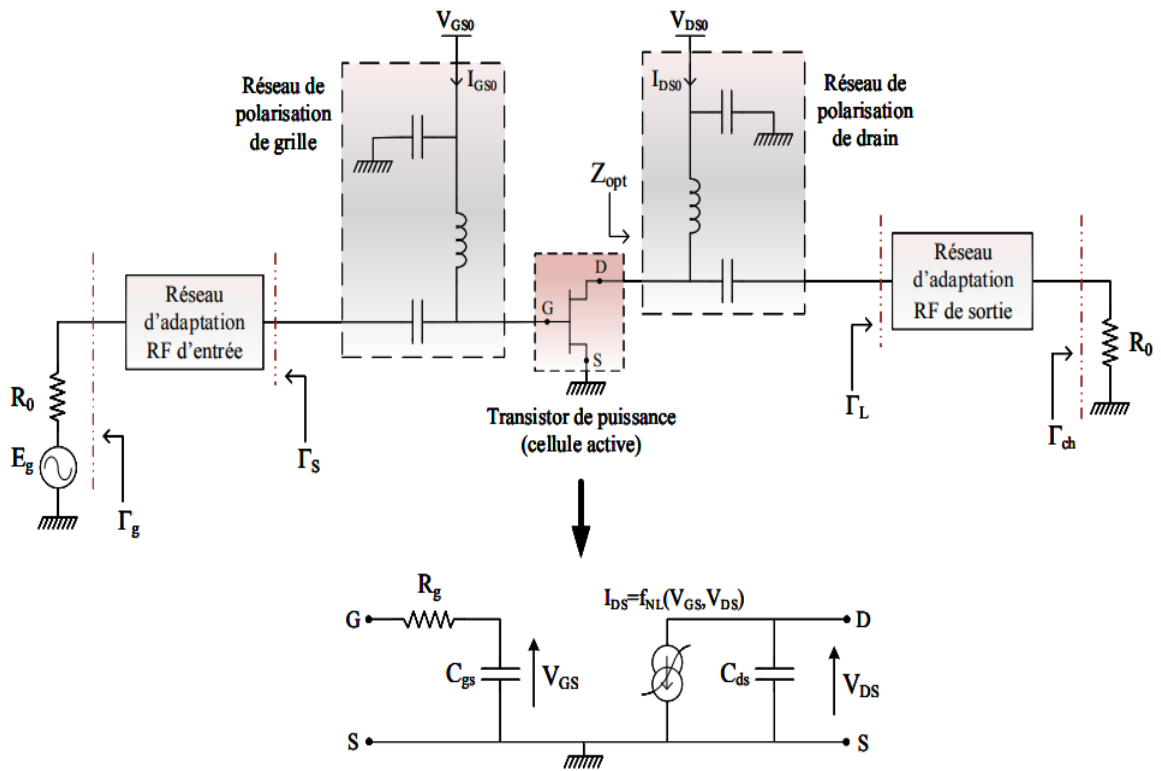


Figure III .1: Synoptique d'un amplificateur de puissance RF. [24]

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

## III.2.2. CARACTÉRISTIQUES D'UN AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE [25]

L'alimentation du montage fournit une puissance totale  $P_f$  qui se répartit entre la puissance utile  $P_u$  dissipée dans la charge et la puissance  $P_d$  dissipée, en pure perte, dans l'amplificateur (figure III.2). La puissance  $P_c$  fournit par le circuit de commande, est en général négligeable devant celle provenant de l'alimentation.

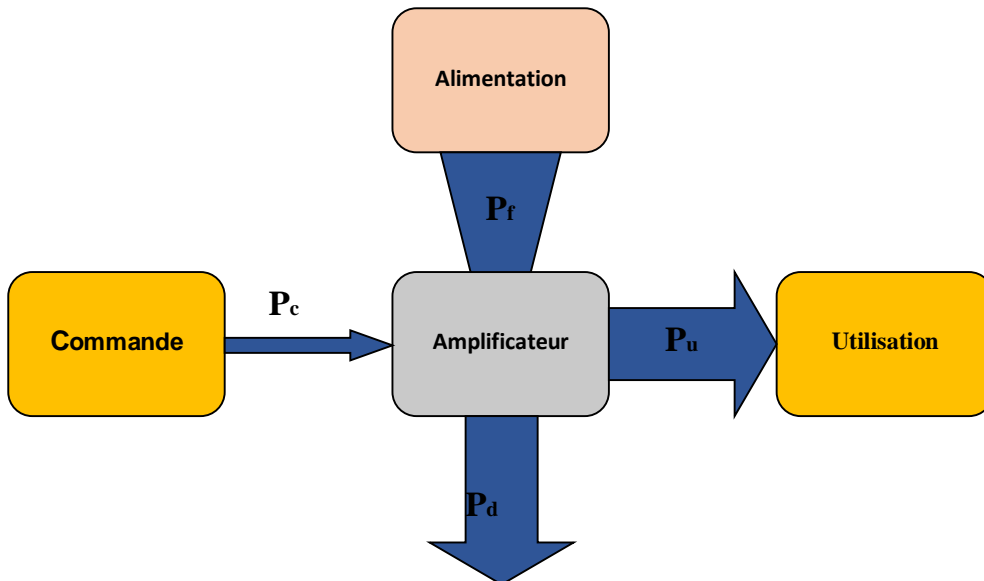


Figure III .2 : Bilan de puissance [25]

On peut définir :

\* La puissance moyenne utile :

$$P_u = \frac{1}{T} \int_0^T p_u(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (\text{III. 1})$$

\* Le gain en puissance :

$$G_p = \frac{P_u}{P_c} \quad (\text{III. 2})$$

\* Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_c + P_f} \approx \frac{P_u}{P_f} n \quad (\text{III. 3})$$

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

\* Distorsion : Lorsque l'amplificateur travaille en grands signaux, le signal de sortie présente de la distorsion dus à la non-linéarité. Cela signifie qu'à une entrée sinusoïdale correspond un signal de sortie seulement périodique.

Ce signal de sortie  $v_s(t)$  est décomposable en série de Fourier sous la forme :

$$v_s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{III. 4})$$

- On appelle distorsion d'harmonique notée  $d_n$  le rapport entre l'amplitude  $V_{sn}$  de l'harmonique de rang n et l'amplitude  $V_{s1}$  du fondamental :

$$d_n = \frac{V_{sn}}{V_{s1}} \quad (\text{III. 5})$$

- On appelle distorsion totale notée  $d_t$  le rapport entre la valeur efficace de tous les harmoniques et la valeur efficace du fondamental :

$$d_t = \sqrt{d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_k^2} \quad (\text{III. 6})$$

## III.3. CLASSIFICATION DES AMPLIFICATEURS DE PUISSANCE

### III.3.1 Les classes de fonctionnement [26]

Dans les amplificateurs de puissance RF, le transistor peut se comporter soit comme une source de courant haute impédance, soit comme un interrupteur basse impédance.

La topologie du circuit seule ne permet pas forcément de définir le mode d'opération du transistor ou la classe de fonctionnement de l'amplificateur. Ces classes sont regroupées en deux catégories, suivant le mode d'opération du transistor :

- les classes sinusoïdales : cette catégorie comprend des classes nommées A, B, AB et C. Le transistor se comporte comme une source de courant et la puissance de sortie est proportionnelle à la puissance d'entrée.
- les classes à haut rendement : dans cette catégorie se trouvent les classes notées D, E et F. Le transistor se comporte comme un interrupteur : c'est alternativement un court-circuit et un circuit ouvert et la puissance de sortie n'est pas une fonction linéaire de la puissance d'entrée.

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

## III.3.2. Amplificateurs de puissance Classe A [27]

Les amplificateurs de classe A sont les amplificateurs linéaires les plus fidèles, c'est-à-dire présentant le taux de distorsion harmonique le plus faible, même en l'absence de réaction négative. Leur rendement est toutefois tellement faible que leur usage est généralement limité aux amplificateurs de très faible puissance ou encore aux amplificateurs haute-fidélité haut de gamme de puissance moyenne.

L'amplificateur est constitué d'un étage de sortie ne comportant qu'un seul transistor. Le point de repos se situe approximativement au milieu de la droite de charge. En fonction du signal à amplifier, il peut donc se déplacer de part et d'autre de ce point le long de la droite de charge. La figure III.3 présente amplificateur de classe A :

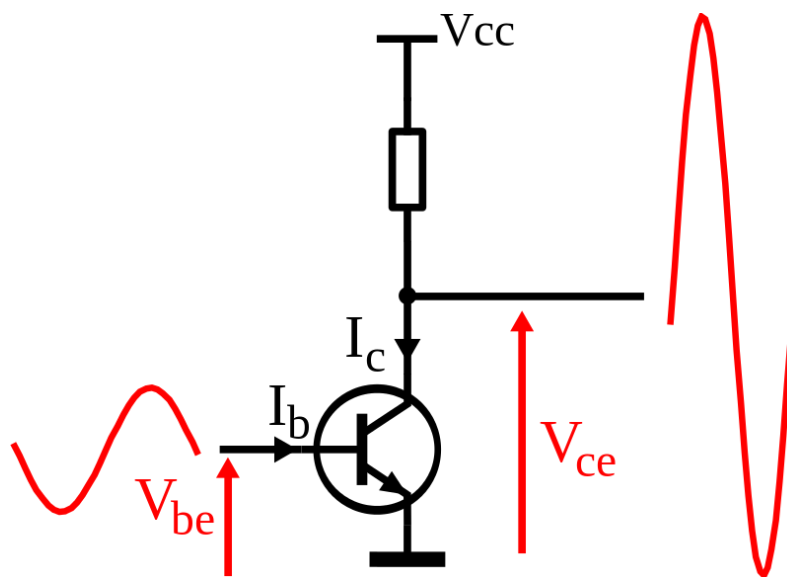


Figure III6: Amplificateur de classe A

## III.3.3 Amplificateurs de puissance Classe B [28]

L'amplificateur classe B est constitué d'un étage de sortie comportant deux transistors complémentaires NPN et PNP. Le point de repos se situe à la limite du blocage de chaque transistor. Pour pouvoir amplifier les deux alternances d'un signal sinusoïdal, il faut que l'un des transistors amplifie les alternances positives et le second les alternances négatives. Les

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

composants actifs conduisent durant une demi-période du signal d'entrée. La figure III.4 présente amplificateur de classe B.

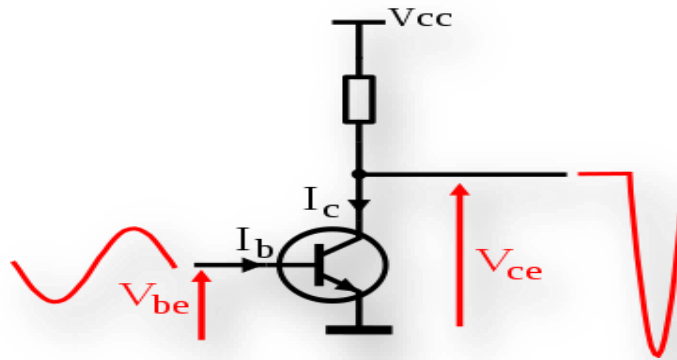


Figure III .7: Amplificateur de classe B

### III.3.4 Amplificateurs de puissance Classe AB [29]

Pour un angle de conduction compris entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ , on parle de fonctionnement en classe AB (figure III.5). Ce type de fonctionnement est obtenu pour une polarisation de grille comprise entre la tension de seuil et le point de polarisation correspondant à la classe A et pour une dynamique du signal d'entrée suffisante pour bloquer le transistor sur une partie du cycle RF (inférieure à la demi période du signal RF).

Tant que le signal d'entrée est faible, le transistor fonctionne en classe A puis lorsque la dynamique du signal d'entrée augmente, le transistor se bloque sur une partie du cycle RF. Dans ce dernier cas, la distorsion apparaît.

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

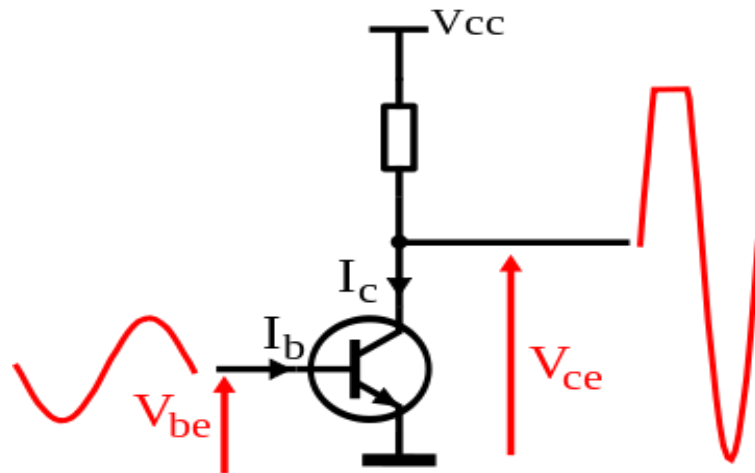


Figure III.8: Amplificateur de classe AB

### III.3.5 Amplificateurs de puissance Classe C [30]

La classe C comporte un ensemble d'angles de conduction de  $\pi$  à 0. Cette classe est la moins linéaire et a une puissance de sortie maximale relativement faible. Cependant, son rendement théorique maximal est compris entre 78,53% et 100%. La classe C utilise le principe de conception lié aux classes linéaires mais répond davantage à une amplification à haut rendement. La figure III.6 présente amplificateur de classe C:

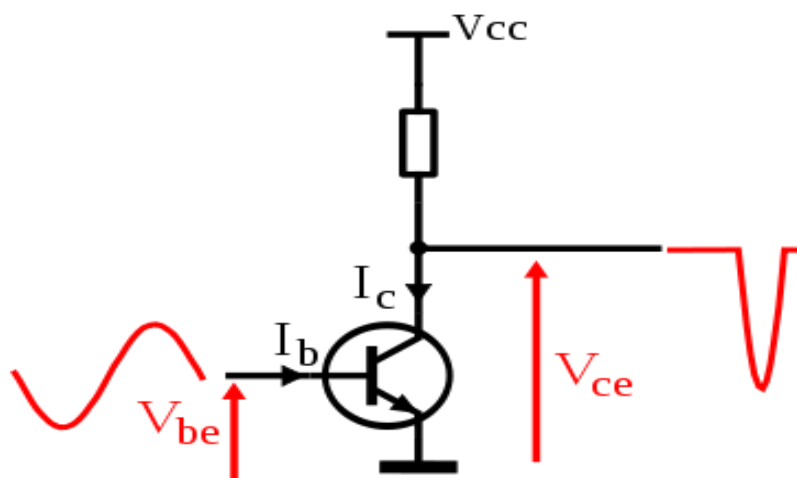


Figure III.9: Amplificateur de classe c



## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

### III.3.6 Amplificateurs de puissance Classe E [31]

Les amplificateurs opérés en classe E offrent une efficacité énergétique qui est significativement plus grande que les autres classes conventionnelles comme AB, B ou C, Il est montré dans la figure III.7. Dans le classe E, le transistor est opéré comme un interrupteur on/off. À l'aide d'un circuit d'adaptation particulier à la sortie du transistor, la forme d'onde carrée du voltage et du courant sont ajustées d'une manière à prévenir la présence de voltage et de courant d'un haut niveau simultanément. La figure III.8 montre la forme d'onde du courant et du voltage sur le drain du transistor opéré en classe E.

On peut constater qu'avec ces deux formes la puissance dissipée est presque nulle. L'efficacité énergétique avec un amplificateur classe E est théoriquement 100%. Pratiquement, un chevauchement inévitable se produit entre le courant et le voltage pendant le délai de transition du transistor. Dans ce délai, une dissipation de puissance DC est observée baissant ainsi la valeur théorique du rendement énergétique de l'amplificateur (Sokal, 1975).

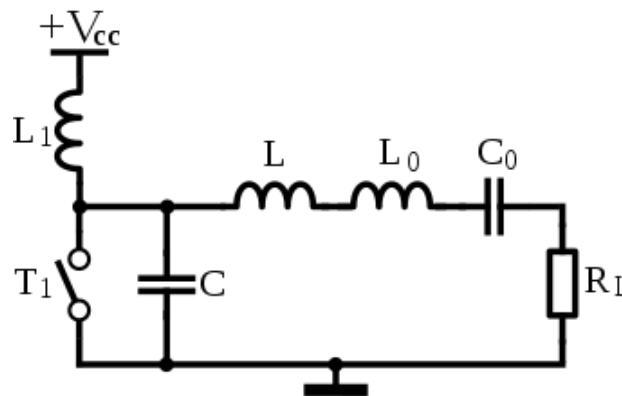


Figure III .7: Schéma de principe d'un amplificateur de classe E.

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

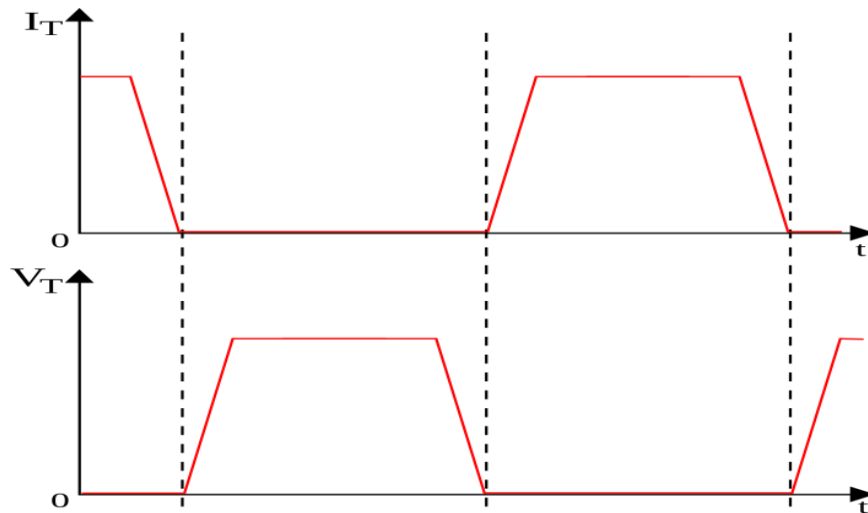


Figure III.8: Formes d'ondes recherchées dans l'interrupteur d'un amplificateur de classe E

### III.3.7 Amplificateurs de puissance Classe F [32]

La classe F intègre un transistor qui fonctionne tel un interrupteur afin d'avoir un rendement très élevé. Étant donné que la commutation du transistor ne se fait pas de manière drastique, il en résulte des pertes énergétiques qui réduisent l'efficacité de l'amplificateur. Dans la classe F, le principe consiste à éliminer les dissipations en écrêtant le potentiel du drain. Des circuits résonnant sont placés à la sortie du transistor pour ajouter des harmoniques au signal de drain afin de l'approcher le plus possible d'un signal carré. Le nombre d'harmoniques en sortie détermine la forme du signal et le rendement de l'amplificateur en classe F. Un rendement de 100% pour la classe F nécessiterait une infinité de filtres résonnant à la sortie du transistor, ce qui est impossible. En pratique, les filtres sont remplacés par une ligne de transmission quart-d'onde. La figure III.9 ci-dessous expose le schéma de l'amplificateur en classe F.

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

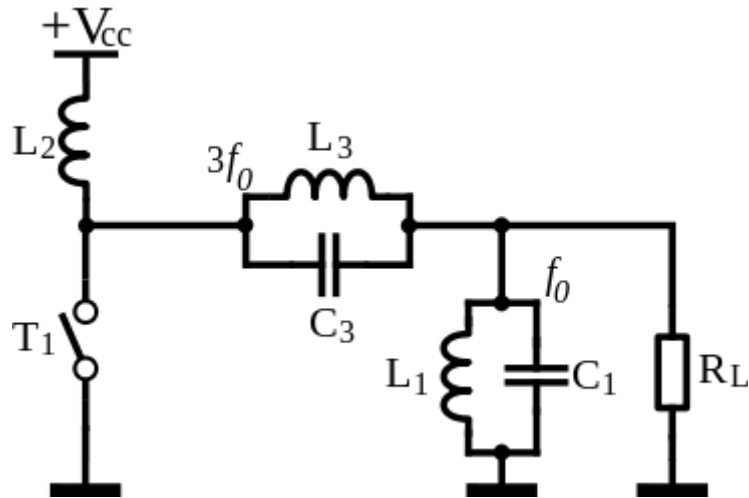


Figure III .9 : Schéma de principe d'un amplificateur de classe F

## III.2. Amplificateurs à faible bruit LNA :

### III.2.1. Introduction :

L'amplificateur faible bruit (LNA) est un des premiers étages d'une chaîne de réception comme le montre (la Figure III.10).

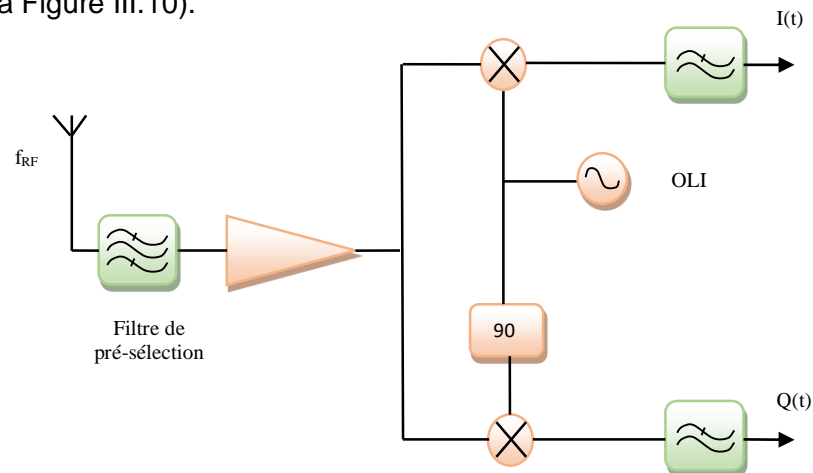


Figure III.10 : Placement du LNA dans une chaîne de communication.

Placé juste après le filtre de sélection du canal, les performances requises pour cet amplificateur sont très sévères. En effet, le LNA doit pouvoir traiter l'information directement à l'issue de l'antenne qui est généralement d'un niveau très faible. En fonction de la puissance transmise et de la portée de l'application, elle peut atteindre un niveau de quelques microvolts

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

tout en étant très bruitée. Afin de traiter correctement cette information, le LNA doit pouvoir amplifier le signal sans trop le déformer mais surtout sans ajouter trop de bruit. [33]

*Le LNA doit donc :*

- ☞ Amplifier le signal reçu.
- ☞ Générer peu de bruit.
- ☞ Etre le plus linéaire possible.

L'amplificateur à faible bruit est principalement utilisé dans les systèmes de communication, système de radar, stations Terre-satellite et en radio télescope. L'amplificateur à faible bruit constitue le premier bloc dans une chaîne de réception, ses performances en bruit dominent sur la sensibilité du système et déterminent son facteur de bruit et le rapport d'onde stationnaire (ROS) car le LNA est le premier bloc qui reçoit le signal à partir de l'antenne [34].

### **III.2.2 Caractéristiques d'un LNA : [35]**

L'étude des principes de base pour la conception d'un LNA est une étape fondamentale pour la compréhension de l'architecture d'un LNA. À ce titre, la mise en exergue de ses caractéristiques essentielles donc :

☞ **Le bruit** : il est caractérisé par la figure de bruit (Noise Figure - NF) qui représente la dégradation du rapport signal/bruit (Signal Noise Ratio - SNR) entre l'entrée et la sortie du LNA. Généralement exprimé en dB, le NF est égal à :

$$NF = 10 \log_{10} F_{avecF} = \frac{SNR_{entrée}}{SNR_{sortie}} = \frac{S_e/B_e}{S_s/B_s} = \frac{S_e}{S_s} \quad (III.7)$$

☞ **La bande passante** : elle caractérise la gamme ou la plage en fréquence, de fonctionnement adéquat du LNA. Plus elle est large, plus elle permet le transfert d'un maximum de puissance. Ce qui implique de fortes exigences au niveau de la conception du LNA, mais aussi de la chaîne de réception. Idéalement, elle nécessite une courbe de réponse en fréquence étalée dans la plage de fonctionnement. Car une fréquence centrale élevée implique plus de pertes en propagation du signal.

☞ **L'adaptation d'impédance** : par similitude à un dioptre plan en optique, le passage entre deux milieux d'impédances différentes, telle la traversée entre deux milieux d'indices distincts entraîne une perturbation du signal à travers des réflexions et réfractions et par

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

conséquent de la dégradation du gain. Afin de minimiser ce phénomène, il est nécessaire d'établir une interface de transition nommée adaptation d'impédance en entrée et en sortie. Elle est d'autant plus délicate à réaliser que la bande passante à amplifier est grande.

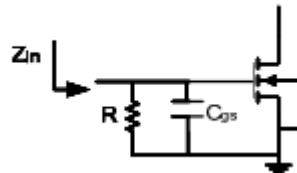
☞ **La dynamique (Dynamique Range - DR)** : elle caractérise la plage du signal pouvant être exploitée avec une qualité satisfaisante. Exprimée en dB, elle est la différence en valeur absolue entre la puissance maximale et la puissance minimale du signal. Elle est limitée vers le haut par la saturation et vers le bas par le bruit.

### **III.2.3. Architectures de base des LNA :**

Il existe plusieurs familles d'amplificateur faible bruit. Chacune est définie suivant le type d'impédance d'entrée qu'elle présente. L'adaptation d'impédance présente une étape cruciale dans la conception des LNAs afin de garantir un bon compromis entre le gain et le facteur de bruit.

#### **III.2.3.1. LNA à terminaison résistive :**

L'adaptation d'impédance d'entrée, généralement  $50\Omega$ , d'un amplificateur à terminaison résistive s'effectue par l'intermédiaire d'une résistance comme illustré à la Figure III.11.



**Figure III.11 : Amplificateur à terminaison résistive**

$$Z_{in} = \frac{R}{1+jRC_{gs}\omega} \quad (\text{III.8})$$

De ce fait il convient de travailler à des fréquences telles que la capacité grille source  $C_{gs}$  des transistors MOS ait une influence négligeable, d'où l'utilisation limitée de cette topologie vis-à-vis de la fréquence de fonctionnement ( $f_0 >$  pour une technologie CMOS de  $0.25\mu\text{m}$ ). D'autre part, les performances en bruit de cette topologie sont plutôt mauvaises [36].

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

## III.2.3.2. LNA à terminaison 1/gm :

L'amplificateur à terminaison en 1/gm est la topologie la mieux adaptée à l'intégration puisqu'elle réalise effectivement son adaptation d'impédance d'entrée à 50Ω par l'intermédiaire de la transconductance gm (figure III.12) :

$$1/g_m = 50\Omega \rightarrow g_m = 20 \text{ mS} \text{ au premier ordre (III.9)}$$

Cet aspect de l'architecture peut s'avérer être un inconvénient puisque par le biais de cette impédance d'entrée est fixe, d'une part, la consommation, ce qui peut être restrictif, d'autre part, on enlève un important degré de liberté d'optimisation de la linéarité [37].

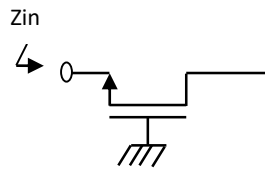


Figure III.12 : Amplificateur à terminaison en 1/gm

## III.2.3.3. LNA à contre réaction résistive :

Le principe de cette architecture est présenté à (la Figure II.13).  $C_{gs}$  et  $C_{ds}$  sont respectivement les capacités grille-source et drain-source associées au transistor NMOS.  $R_1$  et  $R_2$  constituent le circuit de contre-réaction permettant l'ajustement de l'impédance d'entrée via le gain du transistor suivant :

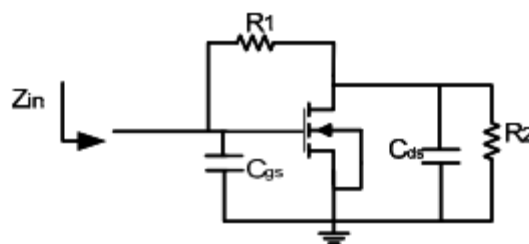


Figure III.13 : Amplificateur à contre réaction résistive

$$Z_{in} = \frac{1}{jC_{gs}\omega + \frac{1-\mu}{R_1}} \quad (III.10)$$

Avec  $\mu$  le gain de l'amplificateur.

Cette topologie présente du point de vue du facteur de bruit des carences :

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

- ❖ Un amplificateur large bande qui intègre le bruit sur une grande bande de fréquence
- ❖ Des résistances de contre réaction qui vont apporter du bruit thermique sur une grande bande de fréquences.
- ❖ Une contre réaction qui va ramener en entrée le bruit de la sortie.

D'autre part, le gain large bande, induit par la charge résistive du circuit, s'accompagne d'une consommation importante, dépassant largement les 10mW, comme le montrent et par conséquent ne permet pas à cette architecture de répondre aux attentes de faible consommation du marché sans fil. Enfin, l'association de la résistance  $R_1$  de contre réaction avec la capacité  $C_{ds}$  présente un pôle de coupure qui réduit fortement la fréquence de fonctionnement. Cela constitue une limitation supplémentaire non négligeable pour les standards de communication se situant au-delà de 5 GHz [36].

### III.2.3.4. LNA à dégénérescence inductive :

Présentée à la Figure III.14, cette topologie est la plus étudiée et utilisée dans les chaînes de réception. L'adaptation d'impédance est réalisée par l'intermédiaire de l'inductance  $L_g$  qui vient annuler la capacité  $C_{gs}$  à la fréquence du signal radiofréquence. L'inductance  $L_s$ , vue comme une impédance réelle grâce à l'effet transistor, est calculée pour être adaptée à  $50\Omega$ .

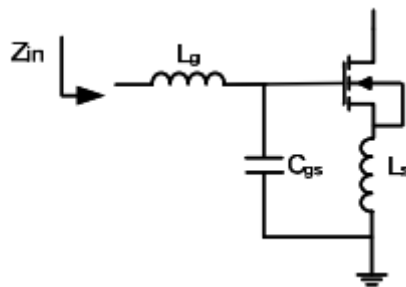


Figure III.14 : Amplificateur à dégénérescence inductive

$$Z_{in} = \frac{g_m}{C_{gs}} L_s + j[(L_s + L_g)\omega - \frac{1}{C_{gs}\omega}] \quad (\text{III.11})$$

Le coefficient de surtension  $Q$  du circuit ( $L_g$ ,  $C_{gs}$ ,  $L_s$ ) permet d'augmenter la transconductance du transistor, donc d'avoir un meilleur gain en tension, mais il est avant tout

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

optimisé pour diminuer le facteur de bruit peut être très faible. Cette topologie s'adapte bien aux contraintes de conception basse tension et faible consommation, néanmoins elle possède un point négatif qui est l'utilisation d'inductances de fortes valeurs donc volumineuses. Ceci induit des coûts de fabrication élevés et dégrade parfois le facteur de bruit ce qui limite l'adéquation de la structure avec les exigences du marché des dispositifs portables. Une solution pour répondre à cette problématique a été proposée. Elle est donnée en figure III.15.

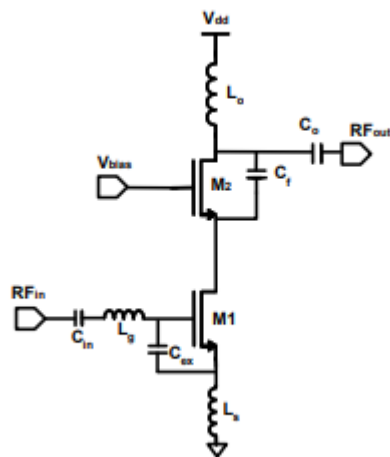


Figure III.15 : LNA à gain et NF optimisé

Elle consiste à ajouter une capacité  $C_{ex}$  entre la grille et la source du transistor  $M_1$  afin d'augmenter la capacité équivalente à l'entrée. Ainsi, elle permet d'alléger la contrainte d'intégration puisque l'inductance  $L_g$  sera réduite. Cette nouvelle topologie possède elle aussi quelques limitations. La valeur de  $C_{ex}$  doit être proprement déterminée afin de présenter un bon compromis entre la taille de  $L_g$  et le gain en puissance voulu. Pour des valeurs très importantes de  $C_{ex}$ , le gain du LNA peut chuter à cause de la dégradation de la fréquence de coupure effective du transistor d'entrée (y compris  $C_{ex}$ ) [36].



## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

Le tableau ci-dessous qui présenter une comparaison entre différente topologie de bas des LNAs.

	Gain	NF	Linéarité	P <sub>conso</sub>	Cout silicium	Bande passante	Haut fréquence
Transmission résistive	Moyen	Dégradé	Bonne	Pas bonne	Réduit	Large	Pas adaptée
Transmission 1/g <sub>m</sub>	Moyen	Moyen	Bonne	Moyenne	Réduit	Large	moyen
Contre réaction résistive	Moyen	Moyen	Bonne	Pas bonne	Réduit	Large	Acceptable
Dégénérescence inductive	Bon	Bon	Bonne	Bonne	Moyen	Etroite	Très adapté

**Tableau III.1 : Comparatif des topologies de base des LNAs**

### **III.2.4 Conception des amplificateurs à faible bruit [38]**

Le facteur de bruit d'un transistor est donné par l'expression :

$$F = F_{min} + 4 \frac{R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_g - \Gamma_{opt}|}{|1 + \Gamma_{opt}|^2 (1 - |\Gamma_g|^2)} \quad (III. 12)$$

Avec :

$F_{min}$  : Le minimum de facteur de bruit du transistor.

$R_n$  : La résistance de bruit pour le transistor.

## Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

---

$\Gamma_{opt}$ : Coefficient de réflexion optimal de la source.

Ces paramètres sont proposés au transistor et dépendent de la polarisation. Pour que le facteur de bruit d'un transistor soit minimal  $F = F_{min}$  il faut que :

$$\Gamma_g = \Gamma_{opt} \text{ (III.13)}$$

Le facteur de bruit ne dépend que de l'entrée, donc pour réaliser un amplificateur à faible bruit on doit satisfaire la condition (III.7).

Si le coefficient de réflexion  $\Gamma_g = \Gamma_{opt}$  est situé dans la zone instable, il est impossible d'opter pour une configuration avec un minimum de bruit.

Sur l'abaque de Smith, le coefficient de réflexion de la source  $\Gamma_g$  en fonction de  $\Gamma_{opt}$  donne des cercles de bruit constant dont la position du centre  $C_N$  et la valeur du rayon  $R_N$  sont données par les expressions (III.8) et (III.9) :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_N = \frac{\Gamma_{opt}}{1+N} \text{ (III.14)} \\ R_N = \frac{\sqrt{N^2 + N(1 - \Gamma_{opt})}}{1+N} \text{ (III.15)} \end{array} \right.$$

Avec :

$$N = \frac{|1 + \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_g|^2)} \quad \text{(III.16)}$$

Le tracé des cercles de bruit constant permet de choisir  $\Gamma_g$  dans la région de stabilité. Parfois, il est préférable de tracer les cercles à bruit constant et les cercles à gain constant sur le même abaque, pour pouvoir faire compromis entre le gain et le bruit.

# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

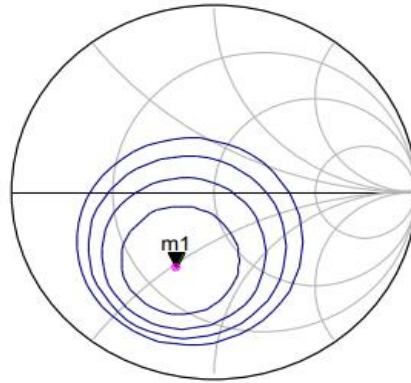


Figure III.16 : cercles à facteur de bruit constante, point m1 correspond à  $\Gamma_{opt}$

## III .3 Simulations sous ADS :

Tout d'abord, nous allons faire une simulation sous le logiciel ADS en utilisant une impulsion RF. Nous plaçons maintenant l'amplificateur relié avec un fil vin au générateur PtRF\_Pulse, et en sortie avec un fil vout relié à une charge R=50 Ohm. On utilise le simulateur d'enveloppe (voir annexe) du logiciel ADS (figure III.17).

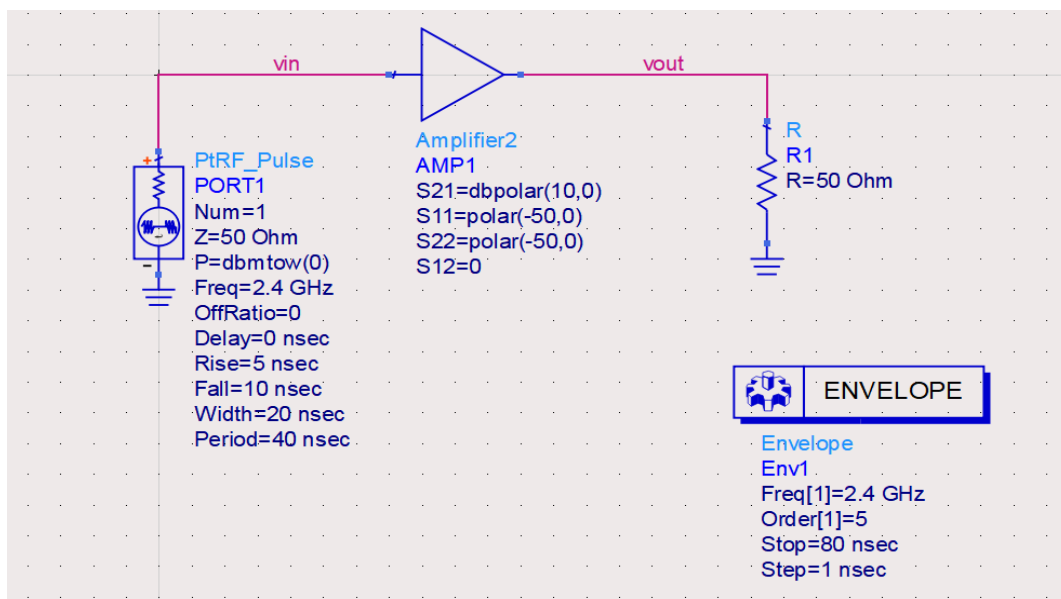
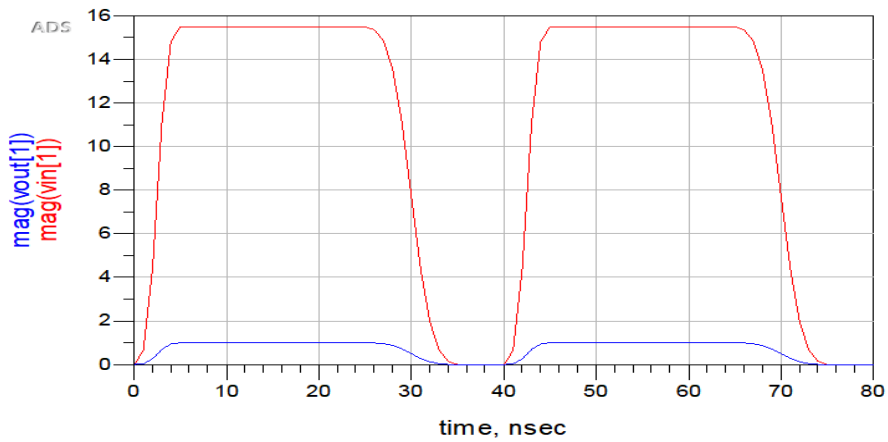


Figure III.17 Simulation avec une impulsion RF.

Afin de visualiser les résultats, nous ouvrons une fenêtre « display » et on trace avec la fonction mag les deux tensions vin et vout en fonction du temps. Les résultats sont présentés sur la **figure II.18**.

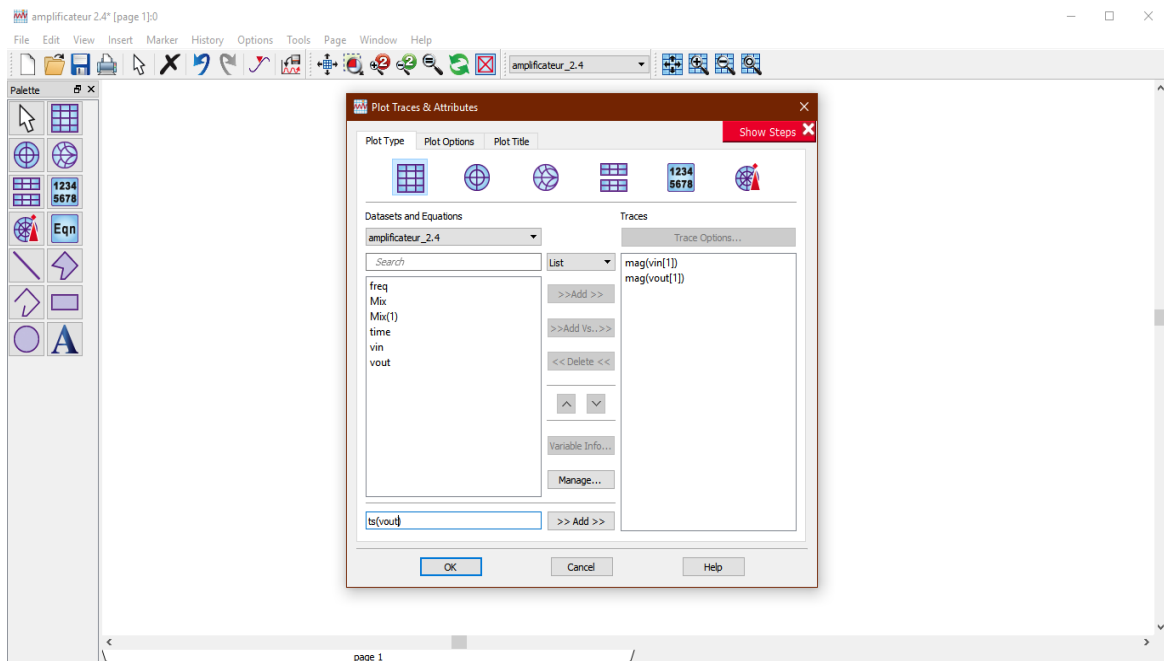
# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit



**Figure III.18 Résultat de simulation.**

Nous voyons dans la figure 2.18 l'effet d'amplification de l'entrée (vin) en violé, représentée par le signal de sortie (vout) en fonction du temps (nsec).

La représentation du signal dans le temps peut être obtenu par la fonction  $ts(vout)$  (figure III.19), comme il est indiqué dans la figure III.20.



# Chapitre 3 : Amplificateurs de puissance et amplificateurs à faible bruit

Figure III.19 Sélection de la fonction ts.

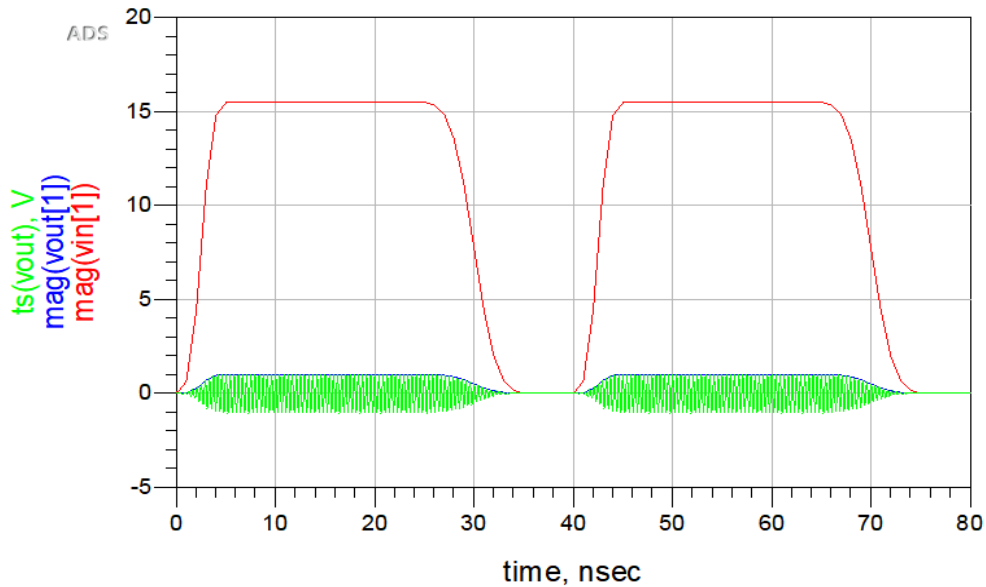


Figure III.20 Simulation avec ts(vout).

Pour conclure l'amplificateur dans un émetteur radio fréquence (RF) augmente la puissance du signal de sa sortie afin que son niveau soit suffisant au niveau du récepteur RF

# **Chapitre 4 :**

**Simulations et interprétations des  
résultats**

# Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

## Chapitre4 : Simulations et interprétations des résultats

### IV.1. Introduction :

Nous étudions le système de transmission sans fil RF pour les applications de WIFI (2.4GHz). En créant un projet pour le système émetteur-récepteur RF, en utilisant des modèles électroniques tels que :

(un Mélangeur, un Filtre, un Oscillateur avec bruit de phase et un contrôleur de bruit, une source RF).

Analysons l'effet des paramètres de ligne de visée sur les performances du système.

Pour effectuer la simulation et l'analyse du spectre du système, nous utilisons l'équilibre harmonique d'un programme.(Voir annexe) [39]

### IV.2. Synoptique d'une architecture d'émetteur-récepteur RF :

Généralement dans un système de communication radio sans fil, comme illustré à la figure 4.1, une information source est située en bande de base module un signal radiofréquence puis transmise par voie hertzienne via une antenne. Le récepteur capte le signal modulé par l'intermédiaire de l'antenne, le démodule et l'envoie vers le système d'estimation des données sources.

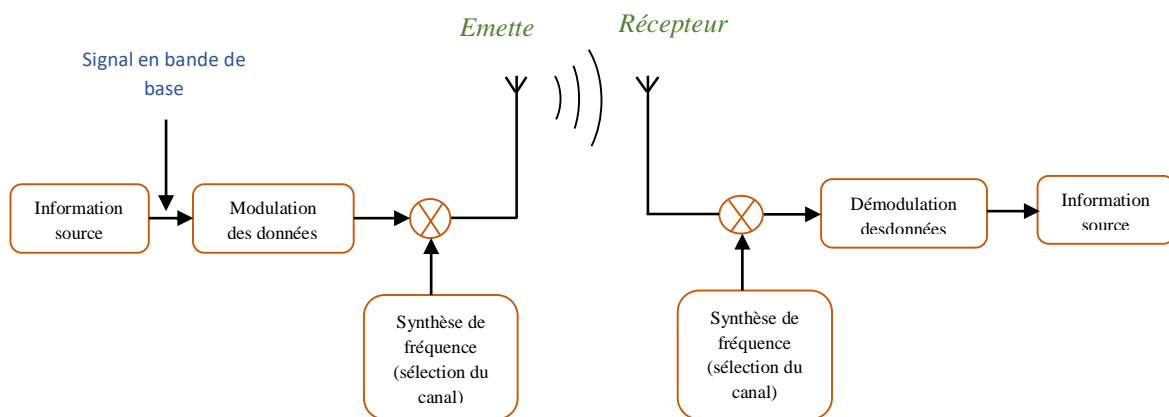
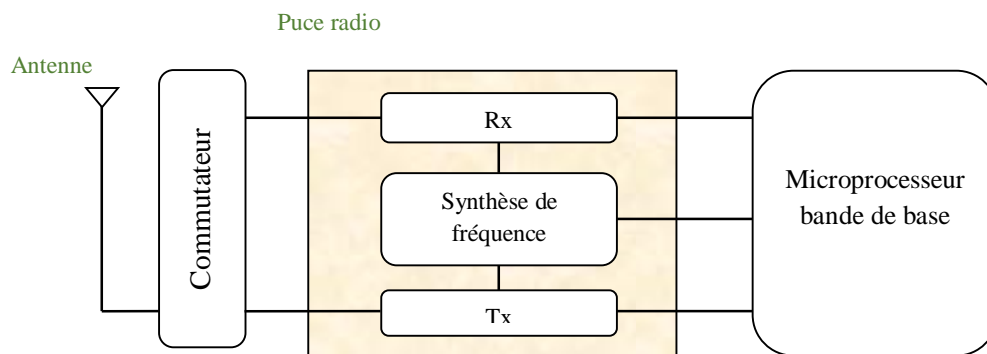


Figure IV.1. Schéma synoptique d'un système de communication sans fil

En réalité chaque entité de la chaîne communicante doit pouvoir aussi bien émettre que recevoir et possède par conséquent à la fois un système d'émission et de réception comme le montre le schéma synoptique de la figure 4.2.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

---



**Figure IV.2 : Schéma synoptique d'un système radio sans fils**

Cette figure montre également l'implantation de la puce radiofréquence dans un téléphone sans fil. Elle est intercalée entre le commutateur "duplexeur incluant les filtres" et une partie numérique, très complexe, qui traite l'information en bande de base par l'intermédiaire d'un DSP (Digital Signal Processor). La puce intègre deux voies (TX) pour l'émission et (RX) pour la réception, ces deux voies sont constituées de montages électroniques de base telles que des mélangeurs, amplificateurs faible bruit (Low Noise Amplifier), filtres, amplificateurs de puissance. La synthèse de fréquences réalisée par une PLL (boucle à verrouillage de phase : Phase Locked Loop). Le bloc RF du système, située entre l'antenne et le circuit numérique, constitue en grande partie la taille et la consommation du dispositif. Ainsi, dans l'optique d'une intégration maximale de cette partie, afin de réduire les coûts du dispositif, les concepteurs cherchent de nouvelles architectures moins coûteuses permettant d'améliorer les performances des circuits intégrés en exploitant au maximum les potentialités de la technologie mise à leur disposition. Pour des raisons de coûts, cette dernière est généralement à base de silicium ce qui entraîne des difficultés dans la réalisation des fonctions radios principalement à cause de la faible isolation du substrat. Toutefois, le silicium reste incomparable en termes de capacité d'intégration des fonctions numériques et de capacité de production. [40]

### IV.2.1. Métriques des récepteurs RF :

Plusieurs métriques peuvent être introduites selon les fonctions électroniques réalisant la chaîne de réception. Parmi ces métriques on peut citer le gain global du circuit de réception (G), la figure de bruit (NF), le point d'interception d'ordre trois (IIP3), le point de compression à 1



## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

dB ou le filtrage. Selon ces caractéristiques, on peut évaluer les performances du récepteur en termes de qualité du signal reconstruit. Toutefois, le récepteur traite non seulement le signal utile, mais aussi des signaux interférant générés soit par le système de réception lui-même, ou bien par les autres systèmes existants comme le montre la figure 4.3 [41].

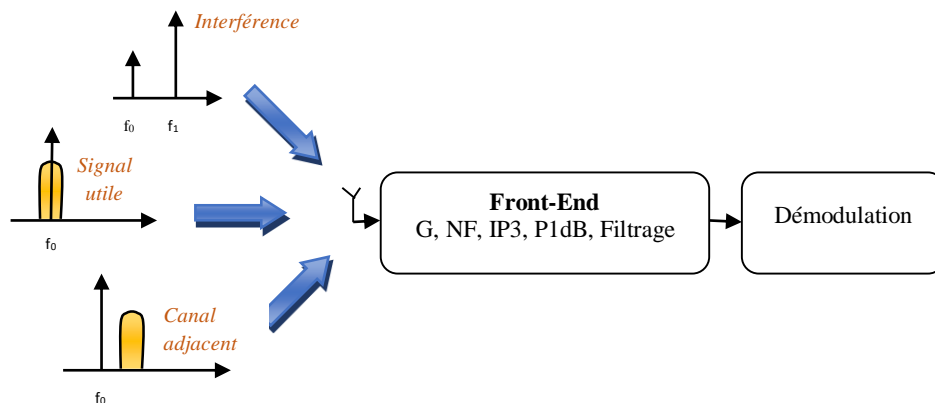


Figure IV.3 Environnement d'un récepteur RF.

### IV.2.2. Critères de qualification d'un émetteur-récepteur :

Les performances en termes de qualité de réception d'un système de communication sont généralement caractérisées par le taux d'erreur binaire de la transmission. Les phénomènes physiques qui agissent sur le taux d'erreur binaire peuvent être classifiés en deux catégories :

- ✚ La dégradation du rapport signal sur bruit causé par l'ajout de bruit suite au passage du signal par les différents blocs analogiques du système. Le paramètre caractérisant ce phénomène est le facteur de bruit.
- ✚ La dégradation de la qualité du signal utile suite au traitement réalisé par des composants analogiques non-linéaire. Les effets consistent soit dans les écrêtages dus à des saturations des circuits électroniques, soit dans les déformations du signal suite à l'apparition des produits d'intermodulation. Les paramètres caractérisant ces phénomènes sont le point de compression à 1 dB et le point d'intermodulation d'ordre 3. [42]

### IV.3. Composants du sous-système émetteur /récepteur :

# Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

## IV.3.1 Mélangeur : [43]

Un mélangeur est un dispositif permettant de transposer en fréquence un signal sans modifier l'information dont il est porteur. Les mélangeurs sont utilisés dans la plupart des systèmes de communications (télécoms, guidage, radars, etc...). Dans tous ces systèmes, les signaux utiles sont transposés en hyperfréquence (RF) pour l'émission en espace libre et sont inversement transposés vers les basses fréquences (FI) en réception pour être traités avec une électronique plus classique. Le mélangeur constitue un maillon essentiel de tout système d'émission/réception fonctionnant aux fréquences micro-ondes.

On distingue deux modes de fonctionnement pour le mélangeur (up-converter et down-converter) qui correspondent respectivement à la transposition de la fréquence FI vers la fréquence RF et à la transposition de la fréquence RF vers la fréquence FI. Certains mélangeurs sont optimisés pour un fonctionnement up-converter ou down-converter alors que d'autres peuvent fonctionner dans les deux modes avec des performances similaires.

Un mélangeur peut donc :

- Soit augmenter la fréquence du signal utile (up-converter)
- Soit diminuer la fréquence du signal utile (down-converter)

Ce principe est illustré dans la figure 4.4 :

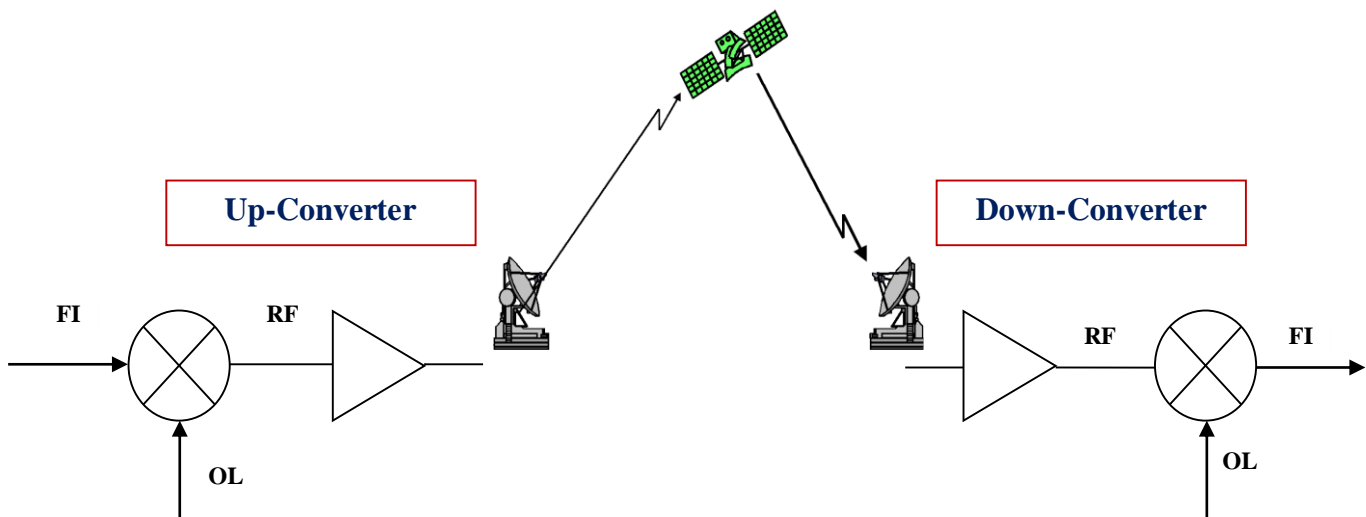


Figure IV.4 Illustration des fonctions Up- et Down- Converter

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

---

### IV.3.2 Filtre : [22]

Il peut servir à sélectionner une bande de fréquence spécifique et atténuer les fréquences indésirables en dehors de la bande. On parle de filtres passe-bas, passe-haut ou passe-bande suivant les fréquences que l'on veut conserver. Il peut aussi servir à modeler la forme d'un signal (chaîne de bits par exemple) dans le but de réduire la bande de fréquence occupée. En effet, toute transition rapide dans un signal, que ce soit en amplitude, en phase ou en fréquence requiert une large bande de fréquence. Le filtrage sert à adoucir ces transitions. Se faisant, il permet de réduire l'interférence avec les canaux adjacents. Cependant, le filtrage nécessite plus de puissance pour transmettre le signal, complexifie les systèmes de communication et peut engendrer de l'interférence entre les symboles (ISI). Les principaux types de filtres sont : gaussiens, cosinus redressé, cosinus redressé à racine carrée. Leur implémentation peut être analogique ou numérique suivant leur fonction et leur place dans le système

### IV.3.3 Oscillateur [44]

Un oscillateur électrique est un système autonome générant un signal de période fixe (cas d'un oscillateur simple) ou variable (cas d'un oscillateur contrôlé en tension ou O.C.T.). La forme du signal peut être sinusoïdale, carrée, triangulaire comme le montre la Figure 4.5, ou encore une combinaison déformée des trois précédentes. Les oscillateurs sont utilisés dans bien des applications, de l'horloge d'un circuit numérique à la source de fréquence d'un oscillateur local (OL). Dans les récepteurs radiofréquences (RF), les signaux des oscillateurs sont utilisés comme référence de fréquence pour « redescendre » le signal RF reçu en bande de base ou à une fréquence intermédiaire particulière (on parle alors de « downconversion »). Dans toutes les applications RF, il est nécessaire d'avoir des références sinusoïdales d'une grande pureté spectrale (bruit de phase faible), ceci constitue d'ailleurs l'une des caractéristiques les plus importantes d'un oscillateur. En effet, ce bruit de phase va déterminer la stabilité de la périodicité des oscillations fournies.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

---

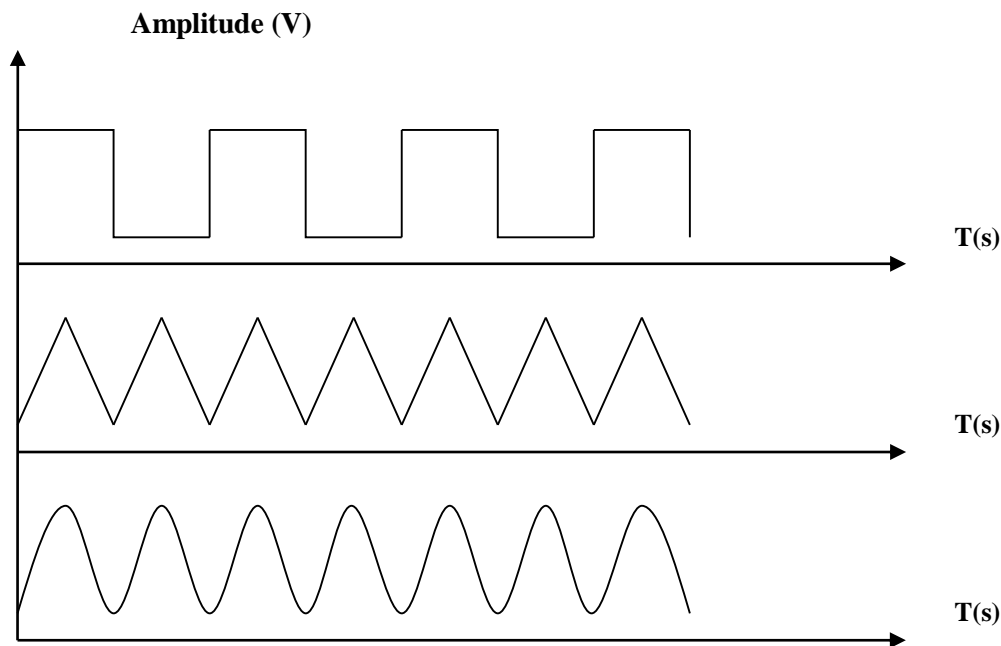


Figure IV.5 Exemples de formes d'ondes de signaux périodiques

### IV.3.4 Butterworth : [45]

Le filtre Butterworth est le meilleur compromis entre atténuation et réponse de phase. Il n'a pas d'ondulation dans la bande passante ou la bande d'arrêt, et à cause de cela, on l'appelle parfois un filtre au maximum plat. Le filtre Butterworth atteint sa planéité aux dépens d'une région de transition relativement large de la bande passante à la bande d'arrêt, avec des caractéristiques transitoires moyennes.

Les pôles normalisés du filtre Butterworth tombent sur le cercle unitaire (dans le plan  $s$ ). Les positions sont données par :

$$- \sin \frac{(2k-1)\pi}{2n} + j \cos \frac{(2k-1)\pi}{2n} \quad k = 1, 2 \dots n$$

Où  $K$  est le nombre de paires de pôles et  $n$  est le nombre de pôles.

Les pôles sont équidistants sur le cercle unitaire, ce qui signifie que les angles entre les pôles sont égaux.

[45]

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

---

### IV.3.5 Les antennes : [46]

L'antenne offre une interface entre l'espace libre et la partie électronique du récepteur radio. Du point de vue système, l'antenne peut être considérée comme un système réalisant l'adaptation d'impédance entre l'espace libre et l'entrée du récepteur. Les principales métriques caractérisant une antenne sont : la bande passante, le gain, la directivité, l'angle d'ouverture du faisceau, la polarisation et la température équivalente de bruit.

La fréquence de résonance d'une antenne dépend d'abord de ses dimensions propres, mais aussi des éléments qui lui sont ajoutés. Par rapport à la fréquence de résonance centrale de l'antenne, les fréquences minimales et maximales d'utilisation sont définies pour des fonctionnements caractérisés par un coefficient de réflexion de 10 dB. La différence entre ces deux fréquences correspond à la bande passante. Cependant, il faut souligner que certaines antennes dites « multi-bande » peuvent fonctionner correctement sur des segments discontinus de bandes de fréquences.

Le gain de l'antenne est souvent défini par rapport à une antenne isotrope idéale qui rayonne un niveau constant d'énergie dans toutes les directions. À titre d'exemple et en utilisant cette convention, une antenne ayant un gain de 3 dBi selon une direction va avoir un gain supérieur de 3 dB au gain d'une antenne isotrope selon la même direction. Une autre approche est de caractériser une antenne par rapport à une antenne dipôle demi-onde ayant un gain de 2 dBi. Un niveau du gain égal à 3 dB indique un niveau du signal de 3 dB plus grand que celui obtenu avec une antenne dipôle.

Le gain d'une antenne est défini comme le ratio entre l'intensité de la radiation selon une direction et l'intensité totale de radiation d'une antenne isotrope. Le rendement ou l'efficacité de la radiation est défini par l'équation :

$$E = \frac{P_r}{P_t}$$

Où  $P_r$  est la puissance totale rayonnée dans l'ensemble de l'espace par l'antenne et  $P_t$  est la puissance totale fournie à l'antenne.

### IV.3.6 Contrôle Automatique du Gain : [22]

L'AGC est utilisé dans les récepteurs numériques RF pour prendre en compte le large éventail de niveaux de signal présents au niveau de l'antenne réceptrice [3]. Ces variations de niveau sont dues principalement au phénomène d'évanouissement (fading en anglais) du signal reçu, qui dépend des conditions de propagation ionosphérique. La dynamique, i.e. l'écart qui sépare le signal le plus faible et le plus fort, est très important

Dans un récepteur. L'AGC calibre le niveau du signal en réduisant le gain des étages IF et quelques fois RF (exemple de la Figure I.1) quand le niveau augmente. Un signal RF fort peut perturber le fonctionnement du mélangeur et créer ainsi une distorsion excessive. Le récepteur RF doit aussi traiter

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

les signaux RF faibles en présence de bruit. L'AGC intervient alors dans la partie RF pour par exemple adapter le gain du LNA en fonction du niveau d'entrée. Utilisé dans la partie IF, l'AGC peut éviter des surcharges et maintenir un niveau raisonnablement constant en entrée du démodulateur. Dans tous les cas, il permet de maintenir un niveau de distorsion admissible quelque soit le niveau de puissance. Il doit également répondre rapidement aux variations de niveau. Un AGC typique amplifie le signal d'entrée grâce à un amplificateur à gain variable (VGA) dont le gain est fonction d'une tension de contrôle. La partie contrôle du gain est numérique et agit directement sur une partie RF (ou IF). Le gain est déterminé à partir d'une image de l'amplitude du signal d'entrée, construite en utilisant des blocs RF et analogiques (mélangeurs, filtres passe-bas, additionneurs...).

### IV.4. Le circuit de simulation sous ADS :

Le schéma de simulation de l'émetteur-récepteur est donné par la figure 4.6.

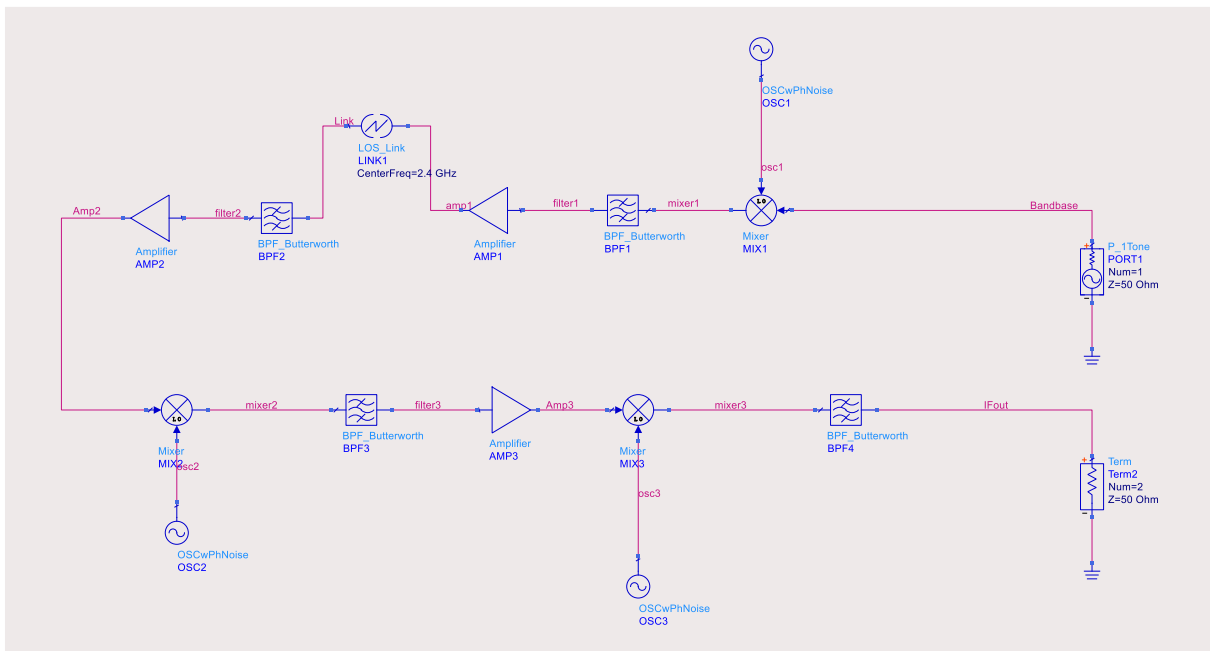
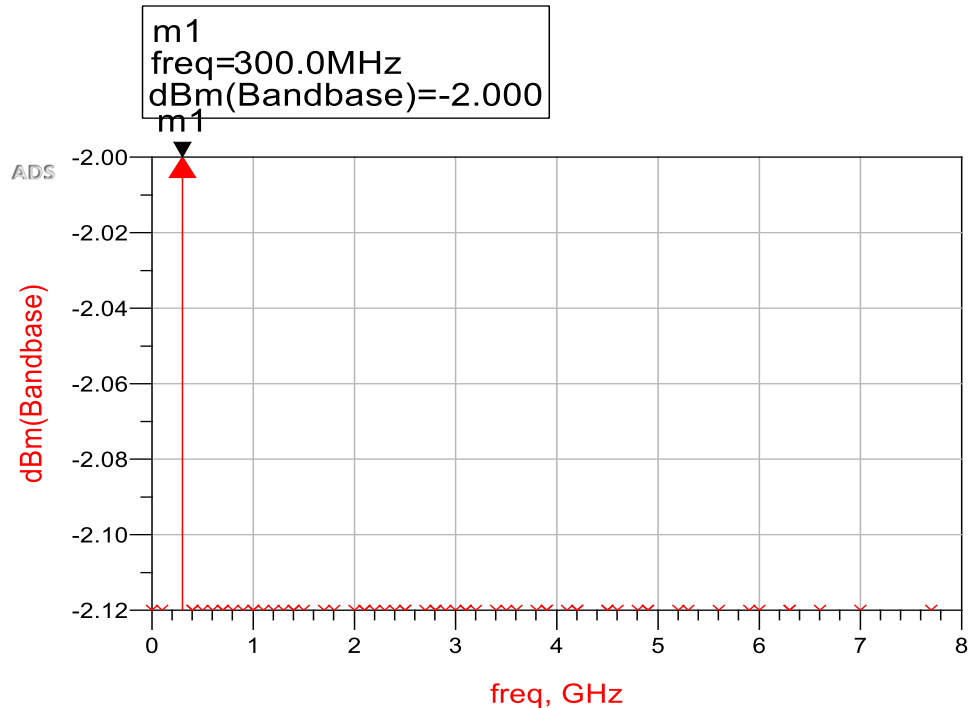


Figure IV.6 Schéma de l'émetteur-récepteur sans fil RF sous ADS

# Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

## V. Résultats et analyse :

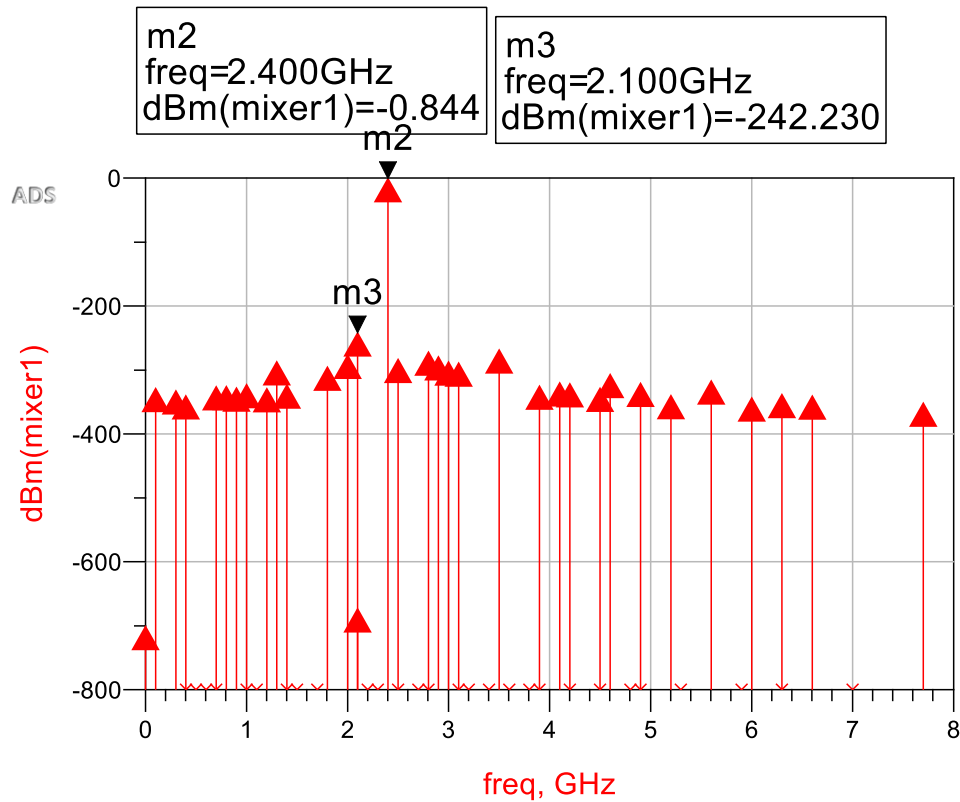
Le spectre du signal en bande de base de PORT1 indique une valeur de puissance de -2 dBm à la fréquence de bande de base de 300 MHz (Figure 4.7).



**Figure IV.7 Spectre du signal en bande de base en dBm**

D'après la figure 4.8, le spectre du mélangeur indique la fréquence radioélectrique, 2400 MHz (2100 + 300 MHz), résultant de la conversion à la hausse de LOfreq1 et de la bande de base. La puissance (en dBm) du SI est de -0.844 dBm. Le spectre montre également d'autres produits parasites (ou harmoniques indésirables) issus du mélange.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

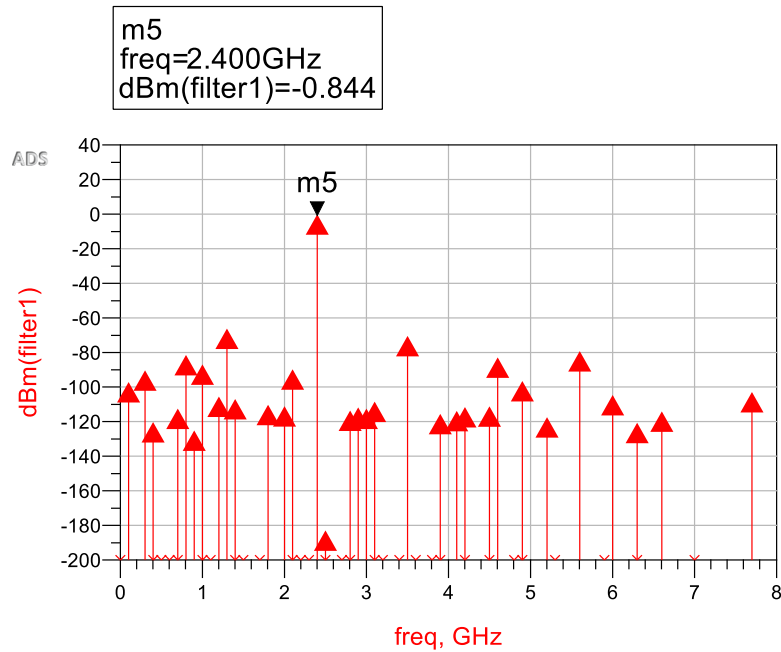


**Figure 4.8** Spectre du mélangeur

Après la conversion ascendante, un filtre à bande passante étroite est nécessaire pour supprimer toutes les fréquences parasites et empêcher leur transmission par l'antenne, ne laissant passer que la fréquence convertie en fréquence supérieure. Le spectre du filtre1 est illustré à la figure 4.9 ci-dessous



## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats



**Figure IV.9 Spectre Filter1**

Après filtrage, le signal est ensuite amplifié afin de garantir qu'une puissance suffisante est transmise à l'antenne puis au récepteur via l'antenne. Le signal reçu par le récepteur doit avoir des niveaux de puissance suffisants au-dessus de la sensibilité du récepteur pour assurer une réception correcte du signal transmis.

L'amplificateur (AMP1) amplifie le filtre RF de -0,844 dBm à 27,763 dBm. La figure 4.10 montre le spectre de AMP1. Les signaux parasites sont également remarqués dans le spectre.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

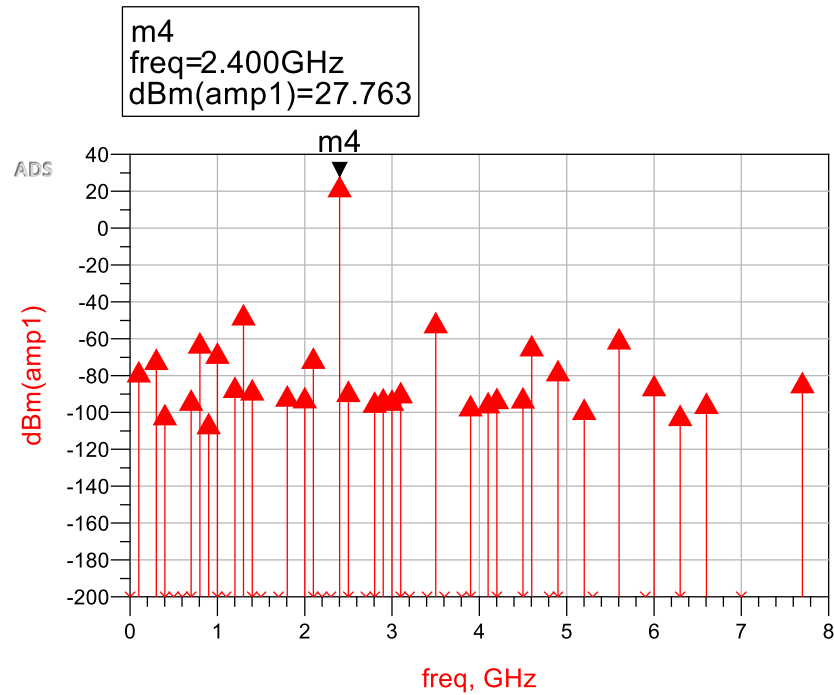


Figure IV.10 Spectre Amp1

Après la transmission, dans l'espace, le signal est atténué par le fait de voyager dans l'espace. Il y a une perte de puissance de 27,763dBm à -10,535dBm, ce qui donne une perte de -38,298dBm. Ceci est illustré à la figure 4.11. Les signaux parasites sont également notés dans le spectre.

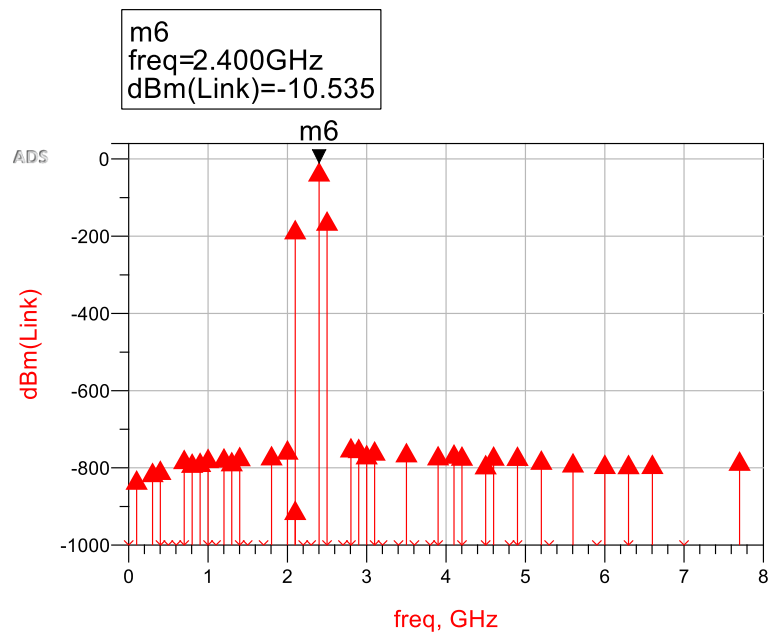


Figure IV.11 Spectre de Link1 à 1 km

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

Les signaux provenant du signal RF reçu sont filtrés afin d'atténuer tous les signaux non désirés dans le spectre transmis avant la réalisation de l'amplification. Le spectre de filter2 est présenté ci-dessous.

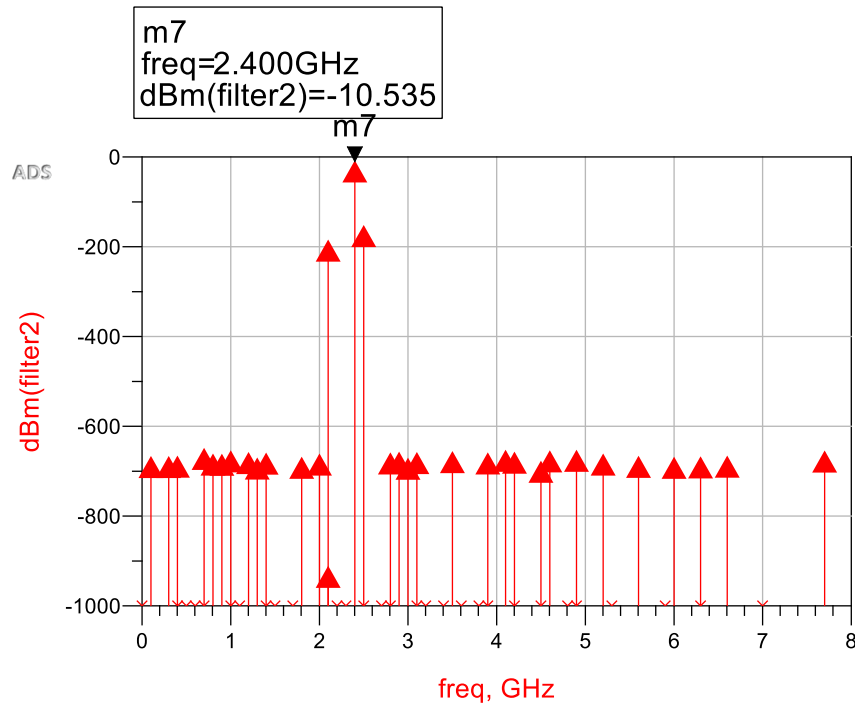
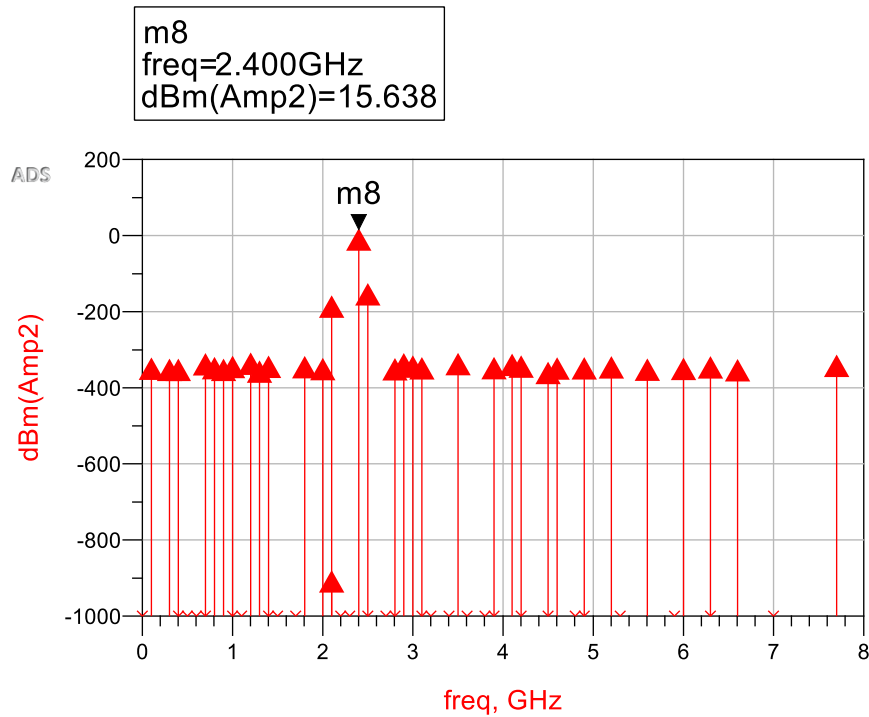


Figure IV.12 Spectre de fréquence du filtre 2 en dBm

Une fois le signal reçu filtré, le signal est prêt pour l'amplification en raison de la forte atténuation de la transmission. Amp2 est un amplificateur à faible bruit (LNA), dont la fonction est d'amplifier les éventuels signaux très faibles reçus par l'antenne du récepteur.

Le signal RF reçu est amplifié par Amp2 de -10,535 dBm à 15,638 dBm. Le spectre d'Amp2 est présenté à la figure 4-12 ci-dessous.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats



**Figure IV.13 Spectre de fréquence Amp2**

Un IF est généré lors de la conversion vers le bas du mix2 du RF, de 2400 MHz à 1000 MHz. Ceci permet d'activer le traitement du signal dans le récepteur. Le FI souhaité généré a un niveau de puissance de 16,390 dBm. La présence de signaux parasites et de bruit d'intermodulation est également visible dans le spectre présenté à la figure 4.13.

La fréquence de l'image générée est

$$\begin{aligned} f_{\text{image}} &= f_{\text{rf}} + 2 (\text{IF}) \\ &= 2400 + 2 (1000) \text{ MHz} \\ &= 2400 + 2000 \text{ MHz} \\ &= 4400 \text{ MHz (4,4 GHz)} \end{aligned}$$

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

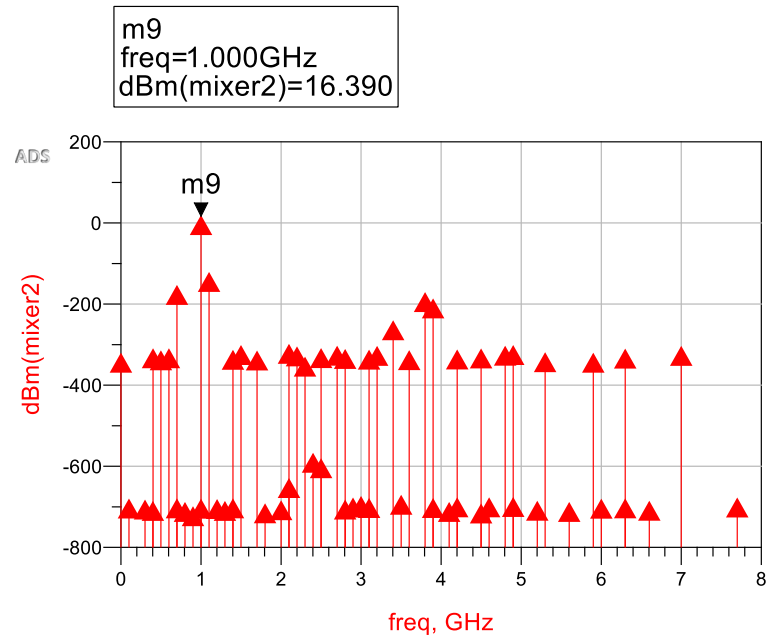


Figure IV.14 Spectre de fréquence de Mixer2 en dBm

Filter3 atténue davantage tous les signaux indésirables du spectre de fréquences mélangé. La sortie du spectre de filter3 est illustrée à la figure 4-14 ci-dessous.

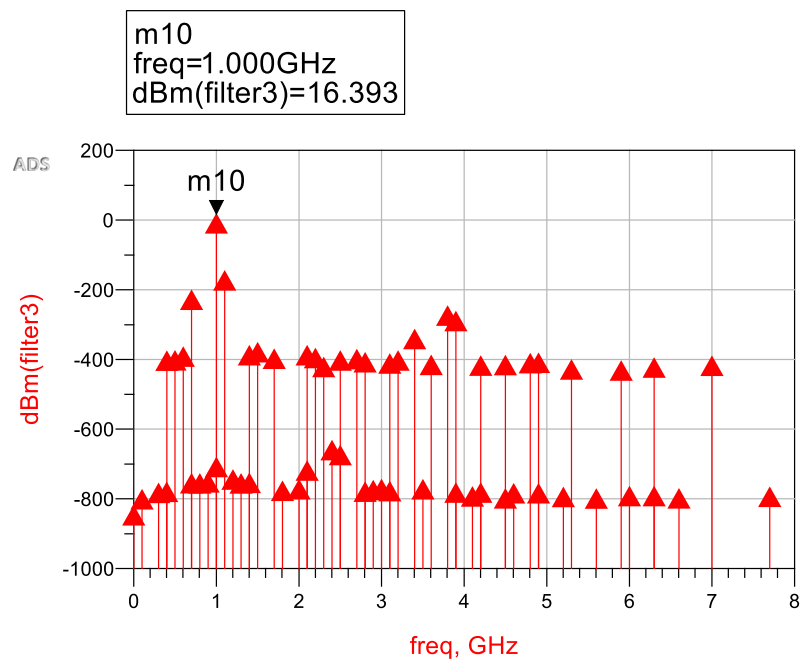


Figure IV.15 Spectre de fréquence du filtre 3 en dBm

Amp3 amplifie le signal filtré en atténuant toutes les fréquences indésirables dans le spectre. Ceci est montré dans la figure 4.15 ci-dessous.

## Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

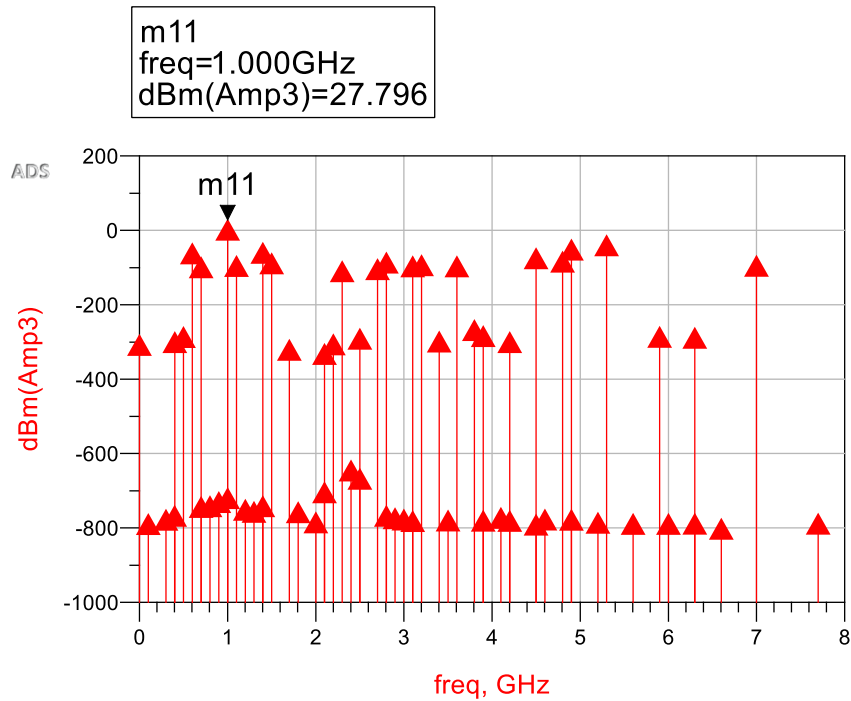


Figure IV.16 Spectre de fréquence d'Amp3 en dBm.

Au cours de cette dernière étape de conversion descendante, la fréquence intermédiaire est convertie de 1000 MHz à 300 MHz, la fréquence de bande de base. La présence de bruit d'intermodulation générée par cette conversion à la baisse est atténuée par filter4 avant que le signal ne soit reconverti dans la forme d'origine au port2. Ceci est illustré à la figure 4-17 ci-dessous.

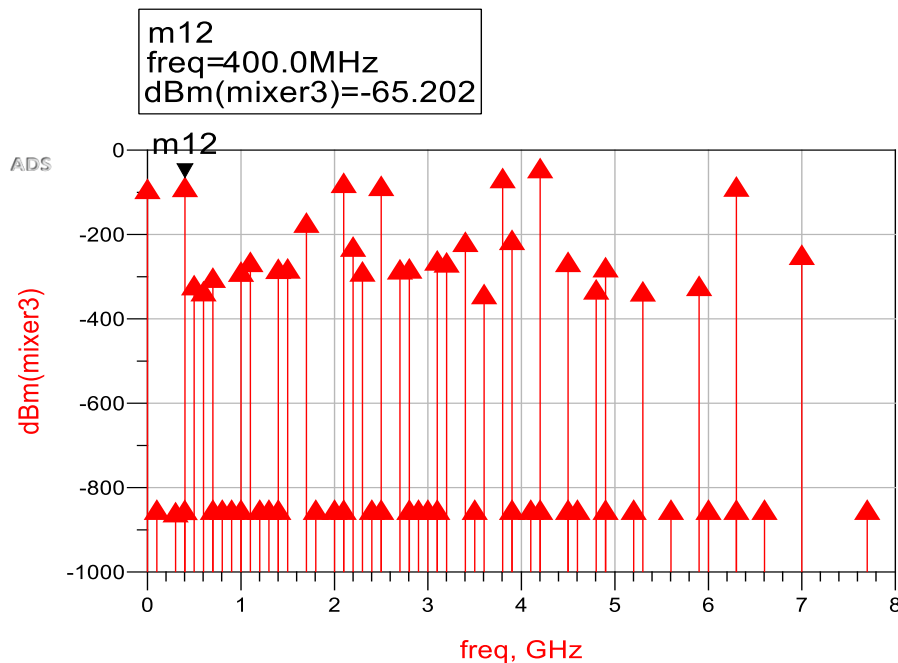


Figure IV.17 Spectre de fréquence du mélangeur3 en dBm

# Chapitre 4 : Simulations et interprétations des résultats

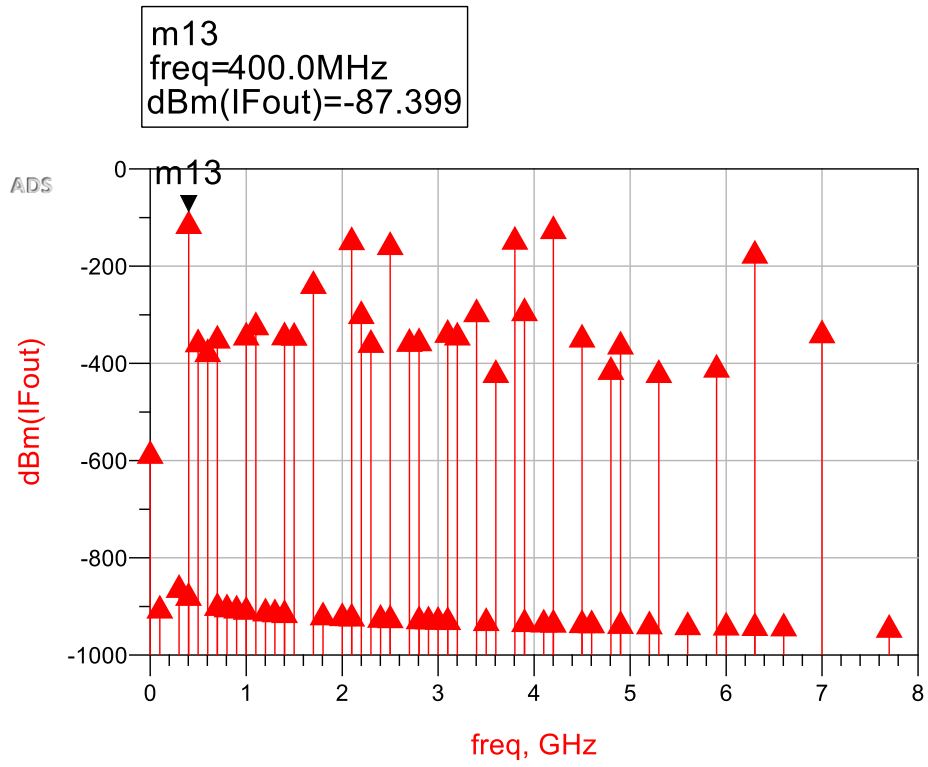


Figure IV.18 Spectre de fréquence

# **Conclusion générale**



## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique sans équivoque au cours de ces dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie à des systèmes performants.

Ces progrès technologiques possèdent des avantages et des inconvénients qui proviennent de leurs caractéristiques propres telles que le débit, l'efficacité spectrale, la consommation, la fiabilité.

A travers ce mémoire, nous nous sommes attachés à concevoir et à étudier la chaîne de transmission radio fréquence complète et la simulation de l'émetteur-récepteur sous logiciel ADS.

Dans la première partie de notre travail, le système de transmission a été étudié. On a suivi le parcours du signal de l'émetteur au récepteur en passant par le canal. Ce qui nous a permis de connaître le fonctionnement des différents blocs de la chaîne de transmission.

Dans la deuxième partie, on va voir le rôle de la modulation et le filtrage dans une chaîne de transmission RF avec leur simulation sous ADS. Ainsi que le cas des amplificateurs de puissances et les amplificateurs à faible bruit LNA.

# **Références**

# **bibliographiques**

# Références bibliographiques

---

## • Références bibliographiques :

- [1] : [http://www.magoe.net/cours\\_system\\_telecom.pdf](http://www.magoe.net/cours_system_telecom.pdf)
- [2] : [https://fr.qwe.wiki/wiki/Communications\\_system](https://fr.qwe.wiki/wiki/Communications_system)
- [3] : **Ianis Aliferis**  
« Transmissions numériques en bande de base ». cours de 4ème année, département d'électronique, École Polytechnique de l'UNSA, le 29 Octobre 2013.
- [4] : <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/histoire-systemes-et-reseaux-telecommunications.aspx>
- [5] **Melle. Ghalem Rachida,**  
« Analyse du système de transmission radio mobile MC-DS-CDMA ». Mémoire De fin d'études pour l'obtention du diplôme Master en Télécommunication 2016.
- [6] : **Mr Bouarfa Abdelkader**  
« Formats de modulation et codes adaptés aux communications numériques optiques à très haut débit ». Université Djilali Liabès de sidi bel-abbés
- [7]: **C. E. Shannon**  
« Coding Theorems for a Discrete Source with a Fidelity Criterion ». IRE Nat. Conv. Rec. Mar. 1959.
- [8]: **Benyarou. Mourad**  
« Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA ». Université Abou BekrBelkaid, Thèse de Doctorat En Sciences, Laboratoire de Télécommunications-Tlemcen, Année2012- 2013.
- [9] : **Daoud khedidja**  
« simulation comparative des techniques FBMC et OFDM pour les réseaux 5G ». Université Abou BekrBelkaid.
- [10] : **Anthony Disserand**  
« Nouvelle architecture d'amplificateur de puissance fonctionnant en commutation ». Université de Limoges - Faculté des Sciences et Techniques.
- [11] : **Design RF**  
[www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html](http://www.emse.fr/~dutertre/enseignement.html)
- [12] : **Julien KIEFFER**  
« Contribution au dimensionnement des PLL pour des modulations polaires larges bandes ». DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.
- [13] : **Aminath BADAROU**  
« Etude et développement d'une architecture radio numérique innovante dans le contexte des communications aéronautiques ». l'Université Nantes Angers Le Mans
- [14] : **Guillaume TERRASSON**  
« CONTRIBUTION A LA CONCEPTION D'EMETTEUR-RECEPTEUR POUR MICROCAPTEURS AUTONOMES ». L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1 ÉCOLE
- [15] : **Manuel CAMUS**  
« Architecture de réception RF très faible coût et très faible puissance. Application aux réseaux de capteurs et au standard ZigBee ». L'Université Toulouse III - Paul Sabatier
- [16] : **caractéristique des récepteurs**, ENS Cachan-Antenne de Bretagne, [edu.ens-rennes.fr](http://edu.ens-rennes.fr)
- [17] : **Y.HAMED I**  
« Etude d'une liaison Radio sur Fibre ». Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunication, Université Abou-BakrBelkaidTlemcen, 2014

# Références bibliographiques

---

- **[18] Michel AL KHOURY**  
« Intégration de filtres Radio Fréquences en technologie intégrée Silicium ». Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LIMOGES, 19 Décembre 2011
- **[19] Farhi Nabila**  
« Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil ». MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN Réseaux et Communications, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA, *Année Universitaire 2015 / 2016*
- **[20] Lucie CHANDERNAGOR**  
« Etude, conception et réalisation d'un récepteur d'activation RF ultra basse consommation pour l'internet des objets ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 16 décembre 2016
- **[21] Virgile Garcia, Matthieu Gautier**  
« Chaîne de transmission GSM. Simulation système sous ADS et analyse vectorielle » Option Transversale Mobilité Mars 2010.
- **[22] Vincent Janicot**  
« SIMULATION DES CIRCUITS ELECTRONIQUES MIXTES RF/ANALOGIQUES/NUMERIQUES EXCITES PAR DES SIGNAUX A MODULATION COMPLEXE ». Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE I , 6 Décembre 2002.
- **[23] : cour 29 amplificateur de puissance**  
<https://www.electronique-mixte.fr/formation-pdf/cours-electronique-analogique/cours-29-amplificateur-de-puissance/>
- **[24] : alexis courty**  
« architecture d'amplificateur de puissance linéaire et à haut rendement en technologie gan de type doherty numérique », université de limoges.
- **[25] : cour " amplificateur de puissance"**
- <https://www.technologuepro.com/cours-electronique-analogique-2/chapitre-6-amplificateur-de-puissance.pdf>
- **[26] : Nathalie deltime**  
« etude et réalisation d'un amplificateur de puissance reconfigurable en technologie bicmos sige pour des applications multi-standards gsm/dcs/umts » l'université bordeaux i .
- **[27] : marc correvon**  
« les amplificateurs de puissance », <https://www.chireux.fr/mp/cours/electronique/chap2.pdf>
- **[28] : abdelmoumene nora**  
« etude et réalisation d'un amplificateur classe a pure pour casque ».université aboubakr belkaïd
- **[29] : pascal reynier,**  
« intégration monolithique d'amplificateurs de puissance multi-bandes à fort rendement pour applications cellulaires ».l'institut national des sciences appliquées de lyon
- **[30] : benmoussa ahlam**  
« etude et conception d'un amplificateur de Puissance pa pour les applications sans fil ».université mohamed khider biskra.
- **[31] : el-asmad mohamad**  
« amélioration de la linearite et du rendement energetique des amplificateurs de puissance de topologie à deux branches pour les communications sans fil; cas d'un amplificateur linc ». Ecole de technologie supérieure,université du québec
- **[32] : elhadji mansour fall**

# Références bibliographiques

---

- « conception d'un amplificateur rf agile en cmos pour les futures générations de la téléphonie mobile », université du québec à trois-rivières
- **[33] : guillaume terrasson**  
« contribution a la conception d'emetteur-recepteur pour microcapteurs autonomes », thèse présentée a l'université bordeaux 1
  - **[34] : djennati abderrahmane zakarya**  
« etude d'un amplificateur à faible bruit et haute linéarité Ina à base de transistors phemt ( ingaas / inalas / inp ) : application aux hyperfréquences ». Université aboubakr belkaïd ,tlemcen.
  - **[35] : patrick henri eyoum**  
« conception d'un amplificateur de faible bruit basé sur. L'optimisation et l'intégration d'une micro-inductance », l'université du québec à trois-rivières.
  - **[36] : aya mabrouki**  
« mise en œuvre de l'effet de substrat dans la conception des amplificateurs faible bruit sous contrainte de faible puissance », l'université bordeaux 1 école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.
  - **[37] : bouchireb mohamed lamine, lounis nassim**  
« contribution à la conception d'un amplificateur à faible bruit pour les applications wlan 802.11 », universite saad dahleb de blida .
  - **[38] : labandji samy**  
« conception d'un système amplificateur pour récepteur millimétriques sans fil », université des sciences et de la technologie houari boumediene .
  - **[39]: OUGAD Mohamed El Amine**  
«Simulation d'une chaîne de transmission radio », mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
  - **[40] : Khalid FAITAH**  
« Conception d'un Mélangeur de Fréquences à 1,9 GHz en Technologie CMOS 0,18  $\mu\text{m}$  et d'un Amplificateur Faible Bruit Large Bande en CMOS 65 nm dédiés à des applications sans fil », UNIVERSITÉ CADI AYYAD SEMLALIA – MARRAKECH
  - **[41] : FRIOUI Oussama**  
« Conception et Optimisation d'Architectures Radiofréquences pour la Réjection du Signal Image : Applications aux Systèmes de Radiocommunications et Liaisons de Proximité ». Thèse de doctorat en Télécommunication, l'Université-Abou Bakr Belkaid-Tlemcen.
  - **[42] : [www.isilf.be/Articles/ISILF14p87ecam.pdf](http://www.isilf.be/Articles/ISILF14p87ecam.pdf)**, « Etude d'un émetteur-récepteur haute fréquence à haut débit »
  - **[43] : PETER BUTTERWORTH**  
« Méthode de conception des mélangeurs millimétriques Application à la réalisation MMIC d'un mélangeur sous-harmonique à FET froid [42-43.5 GHz] ». Thèse de doctorat en Télécommunication, UNIVERSITE DE LIMOGES, 27 Novembre 2003.
  - **[44] : Jérémy Hyvert**  
« Techniques de conception d'oscillateurs contrôlés en tension à très faible bruit de phase en bande Ku intégrés sur silicium en technologie BiCMOS ». Thèse de doctorat, L'UNIVERSITÉ DE POITIERS, 22 septembre 2016.
  - **[45] : CHAPTER 8 ANALOG FILTERS :**  
<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter8.pdf>
  - **[46] : Ioan Burciu**  
« Architecture de récepteurs radiofréquences dédiés au traitement b bande simultané ». Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

