

Chapitre II

Description détaillée d'une Software-Defined- Radio (SDR)

1. Introduction

L'intérêt des systèmes radio logicielle et radio cognitive a été discuté dans le chapitre précédent. Le principal avantage de ces nouveaux systèmes de transmissions est de pouvoir communiquer en utilisant plusieurs standards avec une seule architecture universelle sur un même terminal mobile. Par conséquent, il est très important pour ces systèmes, de posséder de nouvelles architectures agiles, flexibles et versatiles. Celles-ci doivent donc comporter des couches physiques génériques, capables de générer/recevoir toutes les formes d'ondes, et également faire le traitement en bande de base (modulation, démodulation, filtrage, codage et décodage de canal...) de plusieurs normes et standards.

Dans ce chapitre, nous détaillerons les différents éléments constitutifs d'une radio logicielle restreinte, en commençant par l'antenne jusqu'à la partie bande de base. Dans la seconde partie de ce chapitre, les plateformes de la radio reconfigurable disponible seront discutées. Ensuite, nous décrivons l'approche de paramétrisation qui se situe parmi les techniques de reconfiguration actuelles les plus prometteuses, avec différents niveaux envisagés: fonctions communes et opérateurs communs.

2. Le frontal RF (radio fréquence) d'une SDR

Dans une architecture d'émission SDR typique, la partie numérique (DSP par exemple) produit une représentation numérique du signal à transmettre, puis le convertisseur CNA génère une représentation analogique de ce signal à la fréquence FI. Ce signal est ensuite transposé à la fréquence RF, subit une amplification jusqu'à un niveau de puissance approprié et transmis par l'antenne. De même, dans une architecture de réception SDR typique, le frontal RF amplifie puis convertit le signal récupéré par l'antenne à la fréquence porteuse (RF) en une fréquence intermédiaire (FI) de sorte que le signal puisse être numérisé facilement par un CAN, et ensuite traité par la partie numérique (un processeur de traitement numérique du signal ou un FPGA par exemple).

2.1. Antenne

La première composante matérielle d'une radio logicielle restreinte (SDR) est l'antenne, qui est un composant électronique permettant de rayonner et/ou de capter les ondes électromagnétiques. Comme décrit dans le chapitre I, nous avons plusieurs standards et normes, qui travaillent dans une gamme fréquentielle différente les uns par rapport aux autres. Par conséquent, les antennes dans les systèmes de transmission SDR, travaillent autrement que les antennes utilisées dans les systèmes de transmission classique. En effet, il faut disposer des antennes large bande et/ou agiles en fréquence, agiles en diagramme de rayonnement et en polarisation. Donc une antenne est dite agile (reconfigurable ou aussi paramétrable) si elle est capable de modifier dynamiquement sa caractéristique de fonctionnement (en terme de fréquence, et/ou de polarisation et/ou de diagramme de rayonnement) après sa fabrication. Cette modification de la fonctionnalité se fait selon les besoins dictés par l'environnement de l'antenne et les besoins de l'application [32]. Le progrès remarquable de la microélectronique a proposé de nouvelles approches plus efficaces pour obtenir des antennes agiles (reconfigurables). Nous pouvons citer les diodes PIN (Positive Intrinsic Negative), les diodes Varicap, les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), et les commutateurs optiques.

2.1.1. Antennes agiles en fréquence

L'augmentation importante et sans cesse du nombre des standards et normes de télécommunications, tels que le GSM, GPS, UMTS, LTE, BlueTooth, WiFi, WLAN, WiMAX, ainsi le besoin de faire la cohabitation entre eux sur une même antenne acquiert un intérêt croissant. C'est pour cette raison, l'agilité en fréquence de l'antenne devienne une fonctionnalité très importante et indispensable. En plus de cela, le spectre fréquentiel est mal utilisé, là où il ya un gaspillage sur quelques bandes fréquentielles qui ne sont pas utilisées, alors que d'autres le sont de façon intense. Pour une utilisation très efficace de la bande fréquentielle, nous avons les nouveaux systèmes extrêmement flexibles et intelligents tel que la radio cognitive (section 5.3 du chapitre I). L'implémentation de la

radio cognitive impose l'utilisation d'un composant capable de travailler dans une bande fréquentielle très large (une antenne large bande pour la détection et une antenne reconfigurable pour la communication).

Parmi les approches proposées pour réaliser ces types d'antennes, nous citons les réseaux d'antennes patch configurables à base de résonateurs électromécaniques. Dans cette approche chaque élément résonne à une fréquence différente (figure II.1), et l'activation ou la désactivation des éléments résonants est assurée par les commutateurs micro-électro-mécaniques (MEMS). Grâce à cette technique, il est possible de reconfigurer l'antenne pour s'adapter à différentes bandes spectrales.

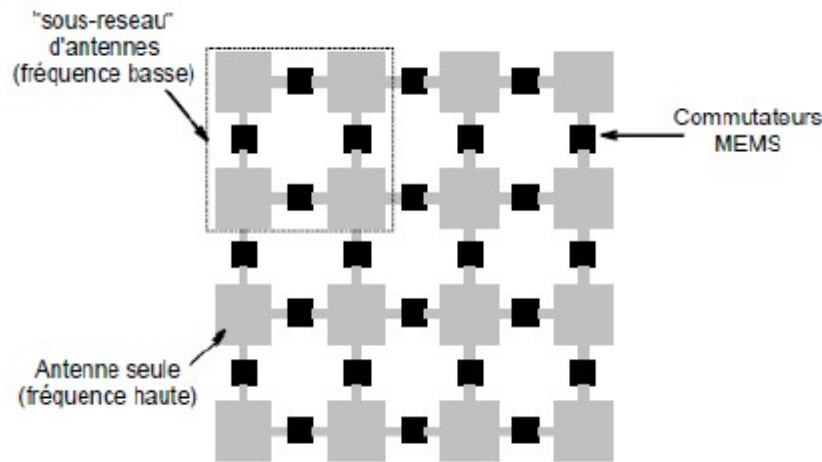


Figure II.1 : Réseau d'antenne patch configurable.

D'autres approches utilisent des matériaux (substrats) "intelligents" ou encore "agiles". L'importance de ces matériaux est que leurs propriétés électromagnétiques comme la permittivité et/ou la perméabilité, peuvent être modifiées par l'application d'un champ électrique et/ou magnétique externe. Ces matériaux utilisés comme un substrat peuvent donc assurer l'agilité en fréquence des antennes.

Y. Hawk et al. [33] proposent un schéma d'antenne pour la radio cognitive composé d'une antenne ULB de structure elliptique permettant de couvrir une large bande utilisée pour la détection, et une antenne reconfigurable en fréquence destinée à la communication (les deux antennes utilisées, sont imprimées sur un même substrat). L'agilité en fréquence est obtenue par deux commutateurs photoconducteurs [33]. BEN TRAD Imen [34] propose une antenne carrée multi-bandes avec fente fractale capable de commuter entre quinze bandes de fréquences de 0.5 à 6 GHz. La reconfigurabilité en fréquence est obtenue en intégrant seize diodes PIN le long de la fente fractale. Selon les états des diodes PIN intégrées dans la fente (On ou Off), l'antenne est capable de rediriger le flux de courant et commuter entre quinze bandes de fréquences [34]. En général, le travail dans ce domaine est vaste et sort du cadre de notre travail.

2.1.2. Antennes agiles en diagramme de rayonnement

La diversité de diagrammes de rayonnement est une caractéristique importante pour la conception d'antennes dédiées à la radio cognitive. Une antenne qui doit avoir la capacité de modifier la forme et la direction des diagrammes de rayonnement et de privilégier ou non certaines directions, présente plusieurs avantages comme l'amélioration des débits de transmission, la limitation des interférences avec d'autres utilisateurs. De façon générale, elle augmente l'autonomie afin d'améliorer la performance globale du système. G.-M. Zhang et al. [35] par exemple, proposent une antenne compacte large bande à diagramme de rayonnement reconfigurable (figure II.2).

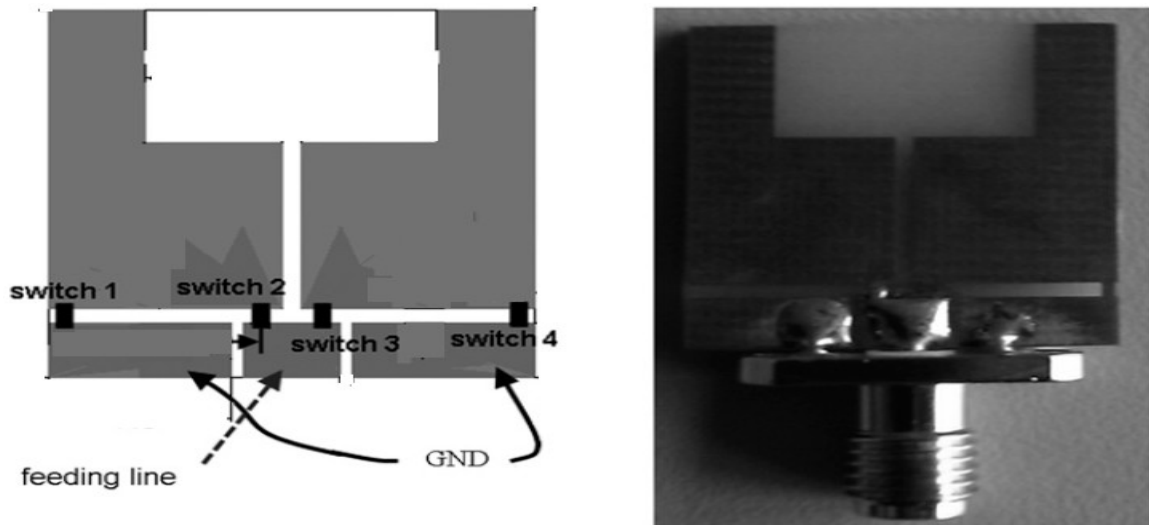


Figure II.2. L'antenne agile en diagramme de rayonnement proposée dans [35].

Ils ont utilisé une paire de patch, quatre commutateurs et une ligne d'alimentation guide d'ondes coplanaire (CPW) comme l'indique la figure II.2. En réglant les commutateurs à l'état On ou Off, les deux patches peuvent alternativement basculer entre le radiateur et le réflecteur (Figure II.2). L'antenne donc peut fournir des diagrammes de rayonnement directionnels de deux faisceaux dirigés plus ou moins dans des directions opposées [35].

2.1.3. Antennes agiles en polarisation

Le troisième type de l'agilité, est la modification de la polarisation linéaire ou circulaire. En effet, pour optimiser les performances du multiplexage spatial tirant partie des phénomènes multi trajets dans les systèmes MIMO, les signaux reçus doivent être non-corrélés, donc la diversité spatiale nécessite une distance minimale entre des sources rayonnantes identiques, ceci augmente l'encombrement des antennes. Pour limiter cet encombrement, la diversité spatiale peut être remplacée par la diversité en polarisation et/ou en diagramme de rayonnement. De manière générale, pour modifier la polarisation de l'antenne, on cherche à modifier le sens et/ou la phase de circulation des courants sur l'élément rayonnant [34].

2.2. Filtres analogiques.

Les filtres jouent un rôle important dans plusieurs applications RF. Ils sont distribués dans les différentes parties d'un émetteur-récepteur sans fils: dans la partie bande de base (BB), dans la partie à la fréquence intermédiaire (IF) et dans la partie radiofréquence (RF). De plus, compte tenu que le spectre électromagnétique est limité et a besoin d'être partagé parmi toutes les applications RF existantes, les filtres sont utilisés donc pour sélectionner/rejeter ou séparer/combiner des signaux de différentes fréquences.

Un filtre analogique agile (reconfigurable) est un filtre dont la fréquence centrale peut être volontairement déplacée, dans une gamme de fréquences pouvant couvrir une fraction importante d'une octave. Pour qu'un tel filtre soit parfaitement adapté à la radio cognitive, cette agilité doit être accompagnée aussi de:

- un changement très rapide de la fréquence centrale, pour ne pas perturber le traitement du signal,
- un coefficient de qualité réglable,
- supporter des niveaux de puissance variables: à l'émission, il a pour rôle d'éviter à l'émetteur de polluer les canaux voisins, le filtre dans ce cas est placé en sortie des amplificateurs d'émission, donc il fonctionne sous forte puissance; à la réception, il permet au récepteur de n'amplifier que le signal utile,
- le filtre qui ne doit pas être uniquement agile en fréquence mais aussi en bande passante afin de pouvoir s'adapter aux gabarits liés aux différents standards.

Dans les paragraphes qui suivent, nous donnons quelques exemples sur les travaux dans les filtres analogiques agiles.

2.2.1. Les filtres passifs LC intégrés

Les filtres passifs intégrés sur silicium sont conçus à base des composants selfs et de capacités. L'agilité de la fréquence centrale, est obtenue par la modification des valeurs de ces composants. Leur avantage réside dans le faible bruit, la grande linéarité et la faible consommation. En revanche, cette agilité est difficilement obtenue. Les seules techniques qui permettent leur reconfiguration est l'utilisation des composants micromécaniques déformables appelés "Micro Electro Mechanical Systems" (MEMS). Dans la première application des MEMS, les capacités d'un filtre agile sont constituées de deux électrodes l'une est fixe et la deuxième est mobile. L'électrode mobile se déplace en utilisant les MEMS ce qui va modifier la valeur de la capacité (variation entre C_{max} et C_{min}). La variation de la capacité permet de varier la fréquence centrale [37]. Les MEMS sont utilisés aussi pour commuter différentes capacités, où le filtre agile est constitué d'une banque de capacités, dont certaines sont remplacées par des capacités "MEMS

digitales". La plage de fréquence couverte par ce type de reconfiguration dépend des valeurs des capacités qui sont connectées [36] [37].

2.2.2. Filtres actifs à simulation d'inductance

Les problèmes des filtres passifs résident dans le faible facteur de qualité (ceci revient à l'utilisation des selfs), ils sont relativement volumineux et leurs procédés de fabrication sont encore mal maîtrisés. Dans les filtres actifs à simulation d'inductance, les selfs passives intégrées sont remplacées par des inductances simulées en utilisant le principe du "Gyrateur". La figure II.3, représente un filtre actif à simulation d'inductance à partir de transistors Bipolaires ou CMOS, où la valeur de l'inductance peut être modifiée à l'aide des différents courants de polarisation des éléments [36] [37].

Dans cet exemple (figure II.3) qui représente un filtre passe bande du second ordre, les transistors M1 et M2 permettent d'adapter l'impédance d'entrée du circuit à 50 Ω . Les transistors M3 et M4 constituent l'inductance dont la valeur est modifiable en agissant sur la tension de grille v_{g5} de M5. Les transistors M6 à M10 jouent le rôle d'une résistance négative dont les tensions de contrôle v_{q1} et v_{q2} permettent d'en modifier la valeur. Ceci permet ainsi d'agir sur le coefficient de qualité du filtre. L'étage de sortie M11 et M12 joue le même rôle que celui de l'étage d'entrée [37].

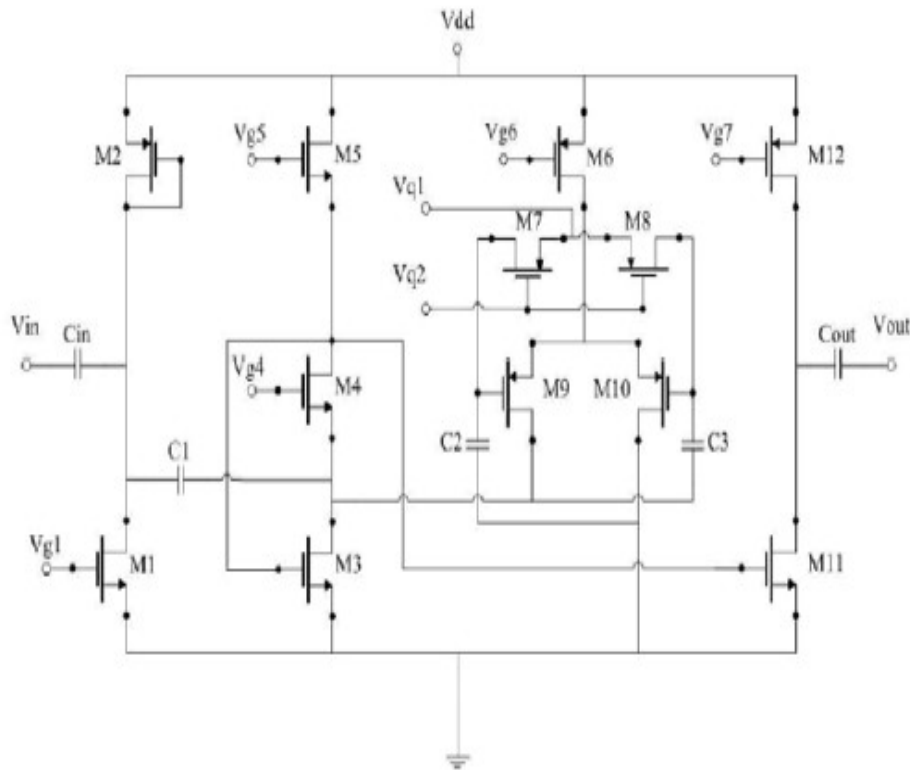


Figure II.3. Filtre passe bande du second ordre avec transistors MOS, [37].

Les résultats de simulation en technologie AMS 0.35 μm montrent que si le filtre est polarisé entre 0 et 5V, la fréquence centrale est variée entre 0.5 et 1.3 GHz, ainsi qu'avec un facteur de qualité supérieur à 60 [37]. D'autres Gyrateurs à base des amplificateurs opérationnels à transconductance (OTA) sont possibles aussi, où les réglages de la fréquence centrale et le facteur de qualité s'effectuent par la variation des courants de polarisation.

2.2.3. D'autres filtres actifs agiles

Yahya LAKYS [37], a démontré que l'ajout d'un amplificateur de contre réaction à gain 'A' variable à une cellule de filtrage classique de second ordre, permet d'obtenir un filtre totalement actif et agile. La fréquence centrale du filtre est facilement réglable si on modifie la valeur du gain 'A' de l'amplificateur de contre réaction. Il a démontré aussi que la variation du gain 'A' de l'amplificateur permet non seulement de varier la fréquence centrale, mais aussi de varier les paramètres caractéristiques du filtre agile: coefficient de qualité QA, bande passante et gains des sorties [37]. D'autres travaux proposent ce qu'on appelle les LNA filtrants. Ceux-ci sont en réalité des amplificateurs à faible bruit (Low Noise Amplification) et un résonateur LC accordable, ils représentent: une fonction de filtrage, une amplification et un faible facteur de bruit.

2.3. Les amplificateurs à faible bruit et les amplificateurs de puissance

Les amplificateurs sont des éléments importants dans les chaînes d'émission-réception radiofréquences et microondes. Dans la chaîne de réception, on trouve les amplificateurs en régime linéaire à faible bruit (LNA ou Low Noise Amplification), et dans la chaîne de transmission, on trouve les amplificateurs de puissance en régime non linéaire (AP) [9].

Les amplificateurs à faible bruit sont surtout utilisés en réception après l'antenne à cause de l'influence de leur faible facteur de bruit sur le facteur de bruit total de la chaîne. En plus, la gamme de puissance des signaux que peut traiter la voie de réception est limitée; pour les faibles puissances, l'amplitude minimale du signal détectable est déterminée par le bruit de l'amplificateur «LNA», et pour les fortes puissances, l'amplitude du signal est limitée par les signaux brouilleurs tombant par intermodulation dans le canal utile, qui gênent ainsi la réception.

Les amplificateurs de puissance RF, sont utilisés en émission car leur rôle est d'amplifier le signal radiofréquence (RF). L'amplificateur de puissance convertit la puissance fournie par l'alimentation (P_{DC}) en puissance émise autour d'une fréquence RF (P_{RF_S}) suivant l'information du signal d'entrée à la fréquence RF (P_{RF_E}). Une partie de la puissance fournie peut être dissipée (P_{dissp}) par l'amplificateur. Le bilan des puissances entrantes et sortantes est donc établi par:

$$P_{DC} + P_{RF_E} = P_{RF_S} + P_{dissp} \quad (1)$$

La puissance dissipée est une puissance perdue et elle doit être minimisée. Le rendement en puissance ajoutée doit actuellement dépasser les 50 % car l'amplificateur de puissance consomme près de 80 % de l'énergie du système radiofréquence complet. L'utilisation de classes de fonctionnement à haut rendement, comme les classes D, E et F, est donc indispensable [38].

Les non-linéarités de l'AP provoquent des interférences dans les canaux adjacents au canal d'émission/réception. La pré-distorsion est l'une des techniques qui peut être utilisée pour rendre linéaire l'amplificateur de puissance. L'idée est de créer une distorsion à l'entrée de l'AP qui annule les distorsions créées par l'AP lui-même (figure II.4) [39].

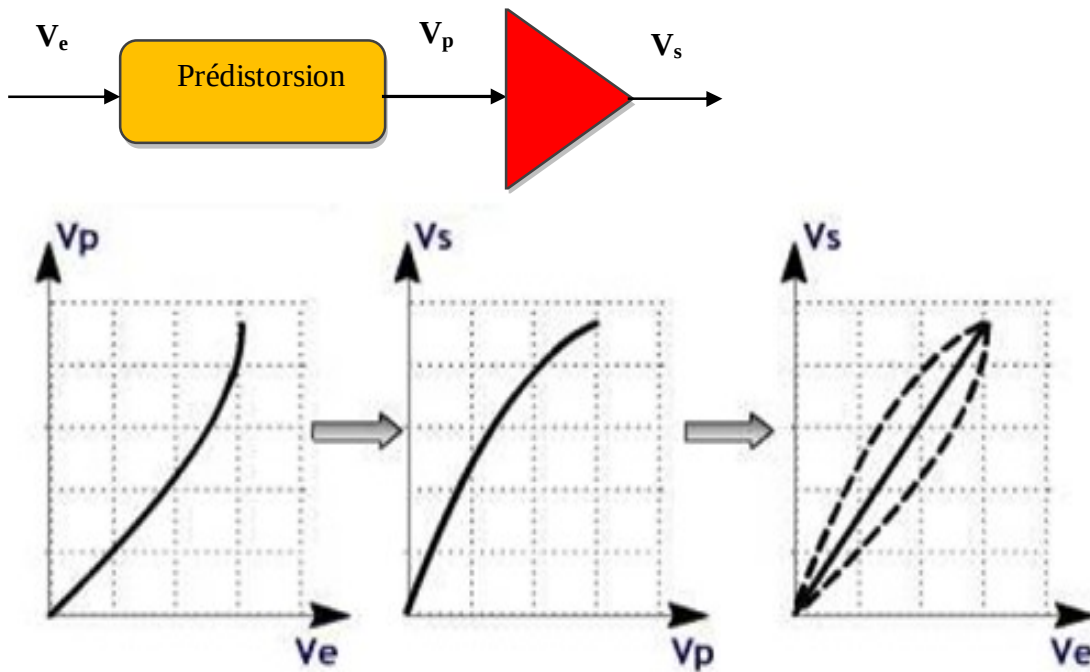


Fig. II.4. Linéarisation par pré-distorsion

La prédistorsion est réalisée par un composant non linéaire générant des distorsions inverses de celles générées par l'amplificateur de puissance (AP).

Un amplificateur de puissance reconfigurable multistandards est un amplificateur capable de modifier dynamiquement, sa linéarité, son rendement et sa fréquence (la bande d'amplification). Cette agilité (reconfigurabilité) se fait suivant le besoin de l'application et les spécifications de chaque standard. N. Deltime et al. [40], proposent un amplificateur de puissance pour trois standards. Ils utilisent un Varicap pour le contrôle de la fréquence, et ils modifient la classe de fonctionnement pour le contrôle de la linéarité avec le rendement.

2.4. Les mélangeurs (Mixers: Up-converters et Down-Converters)

Le mélangeur réalise la multiplication temporelle de deux signaux, l'un étant une sinusoïde pure appelée OL (Oscillation Locale) et l'autre étant le signal utile, ce dernier, peut être un signal de haute fréquence (Radio Fréquences RF) ou un signal de basse fréquence (IF ou BB). Cette multiplication va donc transposer le spectre du signal utile, soit à une fréquence plus basse (Down-conversion) soit à une fréquence plus haute (Up-conversion) [9]. Par exemple, dans la chaîne de réception, le mélangeur transpose la fréquence porteuse du signal radiofréquence vers une fréquence plus basse, appelée FI (Fréquence Intermédiaire) ou directement en bande de base (BB) (voir figure I.4 du chapitre I).

Dans le cas « Up-conversion », la fréquence d'échantillonnage en sortie du mélangeur doit être égale à la fréquence d'échantillonnage du CNA. L'OL fonctionne déjà à la fréquence d'échantillonnage du CNA, mais la fréquence d'échantillonnage en entrée du mélangeur numérique est généralement beaucoup plus faible. Pour pallier à ce problème on utilise un filtre à interpolation, qui augmente d'un facteur N (facteur d'interpolation) la fréquence d'échantillonnage du signal d'entrée bande de base.

Dans le cas « Down-conversion », on peut diminuer le taux d'échantillonnage d'un facteur N par la décimation. En effet, en réduisant la fréquence d'échantillonnage, on peut réduire considérablement le coût et la complexité des processeurs de traitement signal. En général, les contraintes imposées au mélangeur sont fortes en termes de gain, de bruit, de linéarité et d'isolation [41].

2.5. Synthétiseur de fréquence

Généralement, la synthèse de fréquence se réalise à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) et les éléments les constituants sont :

- L'Oscillateur Contrôlé en Tension (OCT ou Voltage Controlled Oscillator : VCO),
- Le diviseur de fréquences,
- Le comparateur de phase/fréquence,
- Le filtre de boucle.

La boucle à verrouillage de phase est un système à contre-réaction qui permet d'asservir la phase instantanée du signal de sortie du diviseur sur la phase instantanée du signal d'entrée. Le comparateur phase/fréquence qui est en réalité un multiplieur, génère un signal proportionnel à l'erreur de phase entre les signaux qui lui sont appliqués. Ensuite, le circuit de pompe de charge délivre un courant positif ou négatif pendant le temps où l'erreur subsiste. La tension résultante vient alors rétroagir sur le VCO afin d'ajuster sa

fréquence à la fréquence instantanée du signal d'entrée. Le filtre de boucle limite le bruit du système, mais aussi le temps de verrouillage.

2.6. Oscillateurs locaux agiles

Les oscillateurs locaux (OL) sont utilisés pour la génération ou la transposition de fréquence. Un oscillateur local doit avoir une très grande pureté spectrale et une forte stabilité en fréquence dans le temps. Un oscillateur local agile pour les systèmes SDR, doit être capable de couvrir plusieurs bandes de fréquence. Pour réaliser de tels oscillateurs agiles, il existe deux techniques qui sont actuellement couramment employées: la première c'est l'utilisation de matériaux de type Grenat d'Yttrium (YIG) qui présentent de nombreux avantages mais répondent à une commande magnétique. La deuxième technique est l'utilisation de diodes Varactor qui répondent à une commande électrique. La deuxième technique est la plus utilisée puisque elle est plus facile à intégrer, malgré le défaut d'une consommation de puissance importante et un facteur de bruit assez élevé. Une autre solution basée sur l'utilisation de MEMS existe [42]. Une autre approche remplace totalement les VCO (Voltage Controlled Oscillator) dans le synthétiseur de fréquence par une structure à base de DLL (Delay Locked Loop – Boucle à verrouillage de délai) [43] qui a permis de générer les fréquences de tous les standards visés.

3. Convertisseurs analogique/numérique et numérique/ analogique

L'étage de conversion analogique/numérique et numérique /analogique joue un rôle très important dans tout système de communication numérique, ces convertisseurs sont considérés comme des éléments critiques avec les amplificateurs et les filtres dans un système de transmission radio logicielle.

3.1. Convertisseurs analogique/numérique (CAN)

Un convertisseur analogique/numérique, est un montage électronique dont la fonction est de faire la transposition d'un signal analogique vers un signal numérique et codée sur plusieurs bits. Un CAN comporte essentiellement quatre éléments (figure II.5): un filtre anti-repliement pour supprimer les fréquences indésirables risquant de se mélanger au signal utile, un circuit d'échantillonnage/blocage pour échantillonner et maintenir le signal d'entrée à un niveau constant et stable pour la quantification, un quantificateur qui transforme le signal analogique en un signal numérique, et une mémoire tampon (*buffer*).

Pour la radio logicielle ou bien la radio cognitive, un convertisseur CAN doit avoir la possibilité de faire la numérisation de diverses formes d'onde avec des performances très élevées en précision. En plus ils doivent travailler à une cadence très élevée comme cela a été évoqué dans le chapitre I.

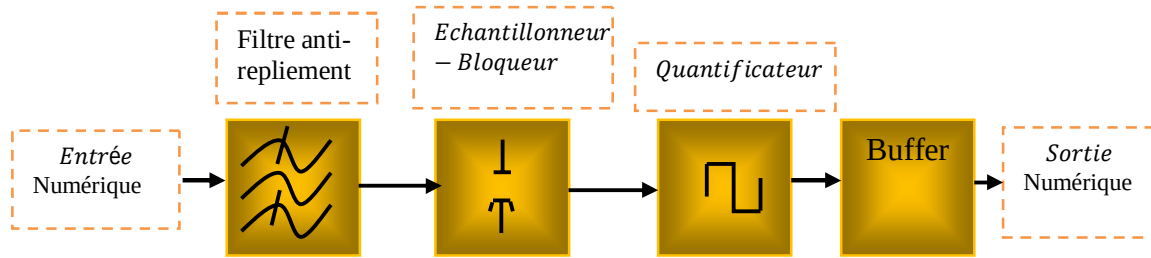


Figure II.5 : Schéma fonctionnel d'un CAN

Les CAN les plus communément utilisés dans les systèmes de transmission numérique sont les convertisseurs "à approximations successives", "flash", "pipeline" et "sigma-delta" [44] [45]. Les convertisseurs de type flash sont les convertisseurs les plus rapides, ils sont adaptés à des fréquences d'échantillonnage très élevées. L'origine de cette rapidité est que le CAN possède plusieurs comparateurs (ils quantifient le signal en le comparant à une suite de tensions de référence). Ce type d'architecture de CAN est capable de faire la quantification du signal à une résolution de n bits en un coup d'horloge. Cependant, cette rapidité s'obtient au prix d'une surface et d'une consommation très élevées. Pour un CAN de résolution n bits cette architecture utilise $2^n - 1$ comparateurs et 2^n résistances. C'est pour cette raison que leur utilisation est limitée aux applications qui n'exigent qu'une résolution modérée, n'excédant pas 8 bits.

Les convertisseurs à approximations successives réalisent la conversion par comparaison en plusieurs étapes, le résultat de la comparaison est stockée dans un registre à chaque étape, jusqu'à l'obtention du résultat final. Contrairement au CAN flash, les CAN à approximations successives nécessitent n cycles d'horloge pour une résolution de n bits.

Par rapport au CAN flash, elles sont donc très lentes, bien qu'elles présentent l'avantage d'une surface très réduite, une réalisation simple et une résolution très élevée (supérieures à 14 bits) [44].

Les CAN pipeline réalisent la conversion en plusieurs étages mis en cascade. Ainsi, à chaque front d'horloge, chaque étage réalise en parallèle une partie de la conversion. Chaque étage est composé d'un échantillonneur bloqueur, d'un CAN flash de faible résolution de k bits, d'un CNA de k bits aussi, d'un soustracteur et d'un amplificateur. Les CAN pipeline présentent un bon compromis entre la rapidité et la résolution.

Le fonctionnement des convertisseurs de type Sigma-Delta " $\Sigma\Delta$ " est fondé sur les principes de suréchantillonnage. Le but du suréchantillonnage qui est en effet un échantillonnage à des fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist, est d'étaler le bruit de quantification sur une bande de fréquences plus large dont l'étalement spectral abaisse ainsi le niveau de bruit. Leur architecture comporte un décimateur qui représente une opération nécessaire dans le cas de « Down-conversion » (voir section 2.4), il peut

donc occuper une double fonction. Le tableau suivant effectue un comparatif des performances de ces différents types de CAN [44] [45].

Tableau II.1. Comparaison entre les principaux CAN de télécommunication.

Type de CAN	Flash	Approximations successives	Pipeline	Sigma-delta ($\Sigma \Delta$)
Avantages	Très rapide. Excellente bande passante.	Hautes résolution et précision. Très bonne bande passante. Faible consommation.	Débit élevé. Faible consommation.	Haute résolution. Filtrage numérique sur puce. Excellente résolution.
Inconvénients	Consommation électrique. Taille de la puce. Faible résolution.	Faible taux d'échantillonnage.	Nécessite une fréquence d'horloge élevée.	Faible taux d'échantillonnage.
Usage	Très haute vitesse sans contrainte de consommation.	Une résolution moyenne à élevée (8 à 16 bits). Faibles puissance et taille.	Haute vitesse 8 bits à 16 bits. Consomme moins que le flash.	Haute résolution. Vitesse basse à moyenne.

Parmi les architectures présentées, seuls les CAN pipeline et $\Sigma \Delta$ représentent les solutions les plus pertinentes en terme de résolution et de fréquence. Le convertisseur $\Sigma \Delta$ présente des caractéristiques indispensables pour une chaîne multi-standard, car il permet de réaliser la numérisation du signal ainsi que la sélection du canal de manière programmable [46].

3.2. Convertisseurs numérique/analogique (CNA)

Comme le CAN, le convertisseur numérique/analogique peut être considéré aussi comme un élément indispensable dans un émetteur SDR. Un convertisseur numérique/analogique, est un montage électronique dont la fonction est de faire la transposition d'un signal numérique, codé sur plusieurs bits vers un signal analogique (figure II.6) selon l'équation (2).

$$I = I_0[a_N 2^0 + a_{N-1} 2^1 + a_{N-2} 2^2 + \dots a_1 2^{N-1}] \quad (2)$$

Où I_0 est un courant de référence, et les coefficients « a_1 », « a_2 », ... « a_N » sont les entrées d'un convertisseur N bits, prenant les états logiques « 0 » ou « 1 » (le bit de poids fort $a_i = 0$ si le niveau logique est 0, et le bit de poids faible $a_i = 1$ si le niveau logique est 1).

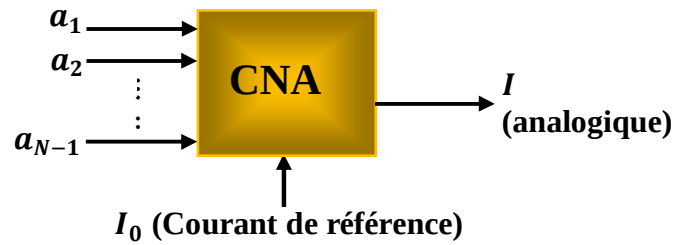


Figure II.6. Synoptique simplifié d'un convertisseur numérique/analogique N bits.

La précision des convertisseurs réside essentiellement dans la précision des résistances utilisées. Pour caractériser un CNA, on utilise généralement la notion de monotonie (la tension de sortie est une fonction croissante du code d'entrée).

4. Le frontal numérique (Traitement en bande de base).

Cette partie de la chaîne de transmissions SDR est la base de notre travail de thèse. Dans la figure II.7, un aperçu global sur les différentes opérations et traitements pouvant être effectués en bande de base ayant été donnés pour les différents normes et standards.

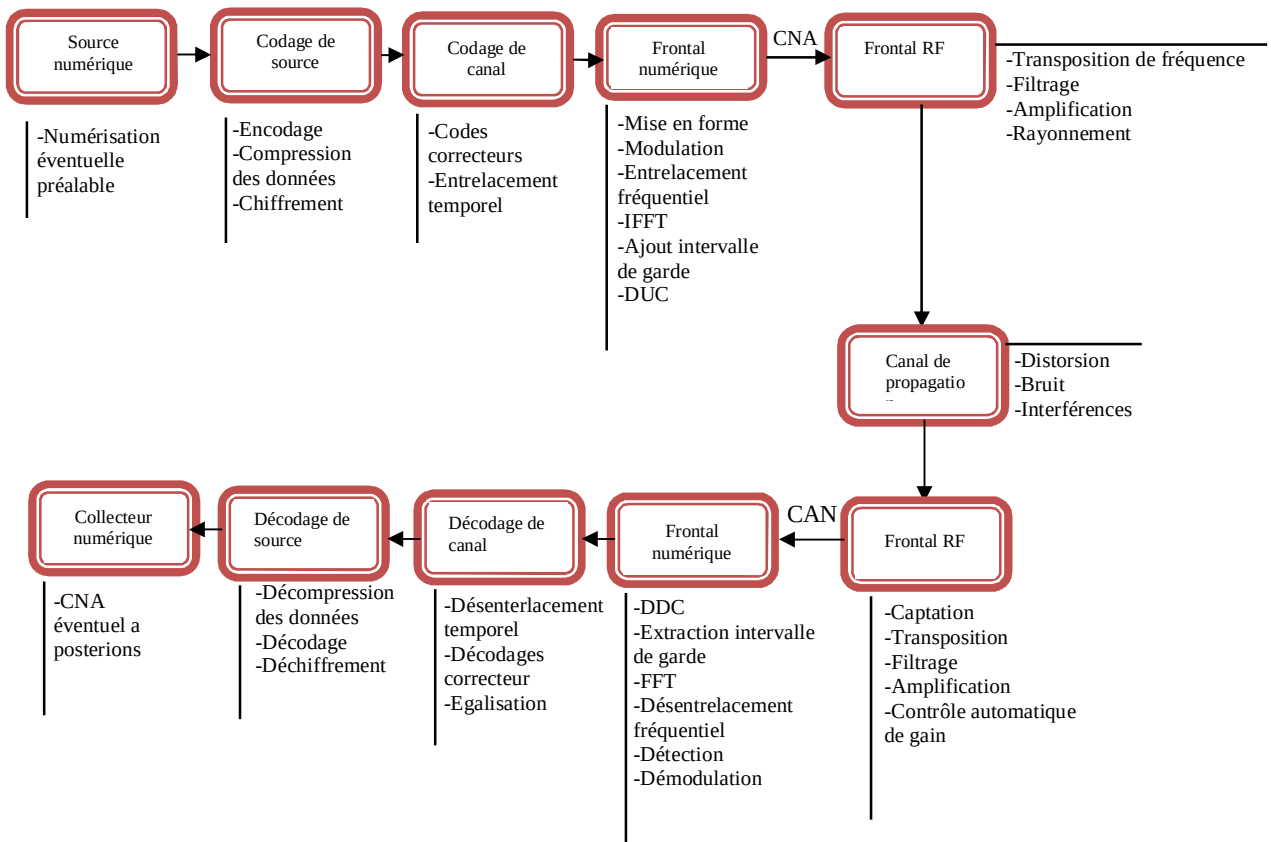


Figure II.7. Les différentes opérations et traitements en bande de base.

Cette figure présente à la fois des fonctions appartenant à la couche physique, et d'autres à la couche de liaison de données. La fonction du codage canal peut appartenir aux deux niveaux simultanément. D'une façon générale, la couche physique dans la chaîne d'émission reçoit les données de la couche Media Access Control - MAC (dont le rôle est

cité dans la section 3 du chapitre I) et effectue de multiples transformations. En réception les échantillons numériques bande de base obtenus après la conversion analogique numérique font l'objet de plusieurs traitements afin d'extraire les informations désirées. Ces transformations et traitements sont le plus souvent dépendants des normes de transmission employées.

Parmi les diverses opérations réalisées, on peut citer:

- **Le codage de source:** le rôle consiste à réduire la taille du message avec ou sans perte d'information afin de minimiser l'occupation de bande du signal et permettre d'envoyer plus de données;

- **Le codage de canal:** l'objectif du codage de canal est de protéger le message contre les perturbations du canal de transmission. En effet, la mobilité dans les communications sans fils est une source de nombreux problèmes qui peuvent nuire à la bonne réception des données. Par conséquent, en ajoutant en émission de la redondance au message, il se forme des bits ajoutés (codage canal) ceci afin de permettre au récepteur de détecter et/ou de corriger les erreurs induites par le canal de transmission (décodage canal). Parmi les codes les plus utilisés, on a les codes de redondance cyclique ou CRC, les codes convolutifs, les turbocodes, qui se basent sur des codages convolutifs en parallèle (ou série), et les codes LDPC (*Low Density Parity Check codes*). Le code convolutif est le plus utilisé dans les communications modernes, il se base sur des opérations récursives simples qui génèrent de l'information en fonction des données codées. Pour faire le décodage du code convolutif, on utilise l'algorithme de Viterbi, qui vise à minimiser l'incertitude des données reçues. Par rapport au codage, le décodage se réalise avec une forte complexité, tant en puissance de calcul qu'en mémoire.

- **L'entrelacement des données:** la technique de l'entrelacement revient à permuter les symboles codés avant leur transmission. Cette opération rend les codes correcteurs plus rentables et efficaces;

- **la modulation:** la modulation effectue une conversion de bits en symboles. Pour une modulation M-aire, on associe à chaque mot de n bits un signal $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, M$ de durée T choisi parmi les $M = 2^n$ signaux. Par conséquent, la modulation permet d'augmenter le débit par la transmission d'une plus grande quantité d'informations sur une bande passante définie. Par exemple dans les modulations BPSK, O-QPSK, 16-QAM et 64-QAM, chaque point de la constellation représente respectivement un, deux, 4 et 6 bits.

Les modulations QAM sont plus sensibles aux modifications de phases et de fréquences, ainsi la probabilité d'erreur en réception augmente avec l'augmentation de la taille de la constellation. Cependant, grâce aux algorithmes de synchronisation sophistiqués, au développement des filtres de grande capacité de filtrage et à la combinaison du codage