

Antennes utilisées par les terminaux mobiles 4G et 5G

Introduction

Une antenne est définie comme étant « la partie d'un système d'émission ou de réception conçue pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques » par l'IEEE Std 145-2013 [1]. En d'autres termes, Les antennes assurent la liaison entre l'émetteur et le récepteur via une onde électromagnétique à travers un canal de transmission.

Les systèmes de communications 4G et 5G utilisent les antennes multiples à l'émission et à la réception. La technologie *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*) permet d'améliorer le débit de la transmission des données. La reconfiguration d'antennes consiste à modifier une ou plusieurs caractéristiques d'antennes.

Dans ce chapitre, nous allons faire une description générale des antennes avant d'étudier quelques types d'antennes utilisées par les terminaux mobiles 4G et 5G. Ensuite les techniques d'amélioration de performances des antennes multiples ainsi que la reconfigurabilité des antennes seront présentées. Enfin, nous présenterons un système d'antennes *MIMO* 4×4 au quel, la reconfiguration de diagramme sera appliquée dans le troisième chapitre.

I.1. Généralités sur les antennes miniatures

Dans un système de communication sans fil, les antennes d'émission-réception (Tx-Rx) jouent un rôle fondamental pour la transmission de l'information de la source vers la destination.

I.1.1. Principe de fonctionnement des antennes

L'antenne émettrice a pour rôle de transformer une puissance électrique P_s en une puissance rayonnée, (ou l'inverse dans le cas de la réception). Elle est susceptible de véhiculer une information transportée par une onde électromagnétique se propageant dans l'espace. Dans cette section, nous ferons un focus sur les antennes utilisées en émission tout en introduisant le principe de la réciprocité qui existe entre les antennes émettrices et les antennes réceptrices. Les propriétés des antennes restent les mêmes qu'elles soient utilisées en émission ou en réception. La figure I.1 montre la représentation d'un émetteur. L'antenne utilisée en réception présente la même structure où l'alimentation est remplacée par un récepteur et en inversant les flèches qui indique le transport de puissance [2] [3].

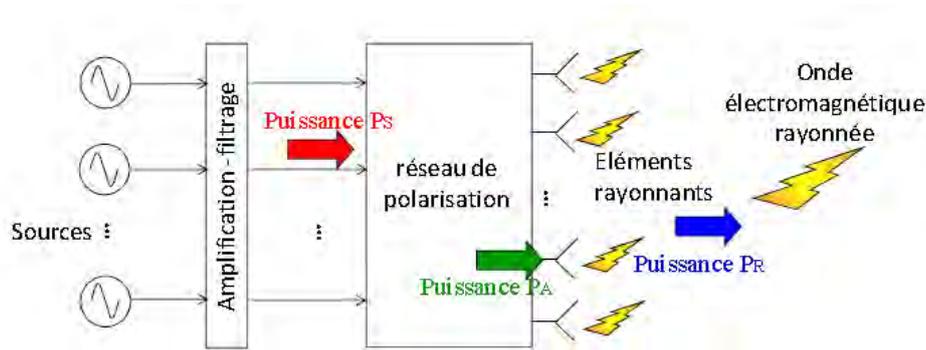


Figure I. 1 : Schéma synoptique d'un émetteur

- ✓ P_S correspond à la puissance électrique délivrée par la source. Le signal à transmettre peut provenir d'une ou de plusieurs sources d'amplitudes et de phases indépendantes.
- ✓ Des amplificateurs et des filtres peuvent être placés entre la source et l'antenne pour fournir une puissance électrique suffisante aux éléments rayonnants afin d'assurer une émission (ou réception).
- ✓ La source (ou le récepteur) est reliée à l'antenne par une ligne de transmission (câble coaxial, guides d'ondes...). Cette ligne permet de transporter une puissance électrique P_A aux éléments rayonnants. La puissance P_A est différente de la puissance P_S fournie par la source en raison des pertes liées à la ligne d'alimentation reliant la source et l'antenne.
- ✓ Le réseau de polarisation permet de connecter les signaux à transmettre aux éléments rayonnants, de les déphaser et/ou les combiner entre eux.
- ✓ Les éléments rayonnants assurent la transmission de l'énergie fournie dans l'espace libre où l'onde va se propager. Réciproquement, ils assurent la transmission de l'énergie d'une onde électromagnétique vers le récepteur.

Il peut arriver que l'installation de l'antenne et sa connexion à la source nécessite d'autres éléments non présentés à la figure I.1 mais qui peuvent avoir une influence non négligeable sur les performances de l'antenne.

I.1.2. Circuit équivalent d'une antenne

Une antenne rayonne efficacement sur une bande de fréquence qui correspond à sa fréquence de résonance. Lorsqu'une antenne est excitée, des charges se déplacent le long de l'antenne donnant naissance à un rayonnement. La résonance correspond à la situation où les charges sont en oscillation permanente. Ainsi, pour la représentation de ce comportement résonnant qui varie en fonction de la fréquence, l'antenne est modélisée par un circuit

électrique RLC. En effet, l'antenne stocke des charges (sous forme d'énergie électrique) appelées effet capacitif. Mais également elle s'oppose à la variation du courant qui y circule (stockage d'énergie sous forme d'énergie magnétique) qu'on appelle effet inductif. On note également une dissipation d'une partie de l'énergie (pertes ohmique). La figure I.2 [3] est une illustration du modèle électrique de l'antenne.

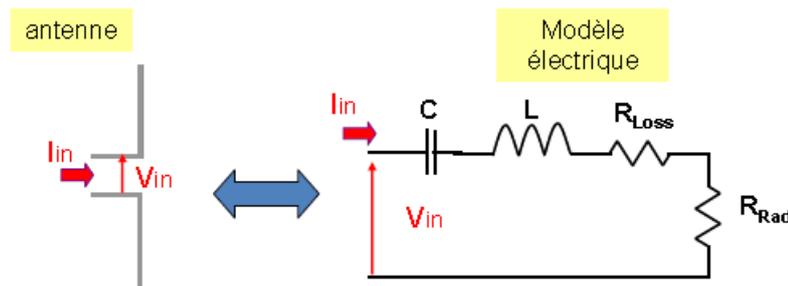


Figure I. 2: Modèle électrique d'une Antenne

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad \text{Eq.I.1}$$

$$\text{Eq.I.2}$$

$$R_{in} = R_{loss} + R_{rad} \quad \text{Eq.I.3}$$

$$X_{in} = j.L\omega + \frac{1}{j.C\omega}$$

Où Z_{in} , V_{in} , I_{in} , R_{in} , R_{loss} , R_{rad} , L , C et ω sont respectivement l'impédance d'entrée, la tension d'entrée, l'intensité d'entrée, la résistance d'entrée, la résistance de pertes, la résistance de rayonnement, l'inductance, la capacité et la pulsation.

L'inductance et la capacité sont liées à la longueur de l'antenne. En basse fréquence, l'antenne a une inductance négligeable, dans ce cas elle se contente de stocker des charges. Cependant l'augmentation de la fréquence entraîne la diminution de l'effet capacitif alors que l'effet inductif accroît. A une fréquence particulière appelée la fréquence de résonance où l'effet inductif et l'effet capacitif sont égaux en magnitude et leurs effets s'annulent. L'antenne est alors équivalente à une résistance pure. En plus si les pertes ohmiques sont négligeables, la capacité à rayonner est liée à la résistance de rayonnement [2].

I.1.3. Paramètres d'antennes

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace. Les directions dans lesquelles cette puissance se propage, vont dépendre des caractéristiques de l'antenne. Dans cette section nous présenterons les caractéristiques des antennes [2].

En effet les caractéristiques de rayonnement sont utilisées pour déterminer la manière dont l'énergie est rayonnée (ou reçue) par l'antenne. Les directions dans lesquelles l'énergie se propage dépendent des caractéristiques de l'antenne. La figure I.3 [3] illustre l'exemple d'une antenne filaire placée dans un repère sphérique (r, θ, φ) . On peut alors exprimer la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$, la puissance rayonnée à une surface élémentaire située à une distance R donnée $P(R, \theta, \varphi)$ et la puissance totale P_{tot} rayonnée dans toutes les directions de l'espace.

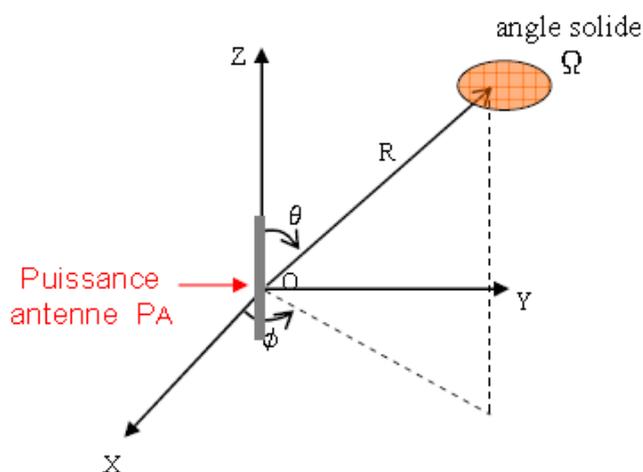


Figure I. 3 : Puissance d'une antenne en un point de l'espace

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega} \quad (W/Sr) \quad \text{Eq. I. 4}$$

$$P(R, \theta, \varphi) = \frac{P_A}{\Omega R^2} \quad (W/m^2) \quad \text{Eq. I. 5}$$

$$\text{Eq. I. 6}$$

$$P_{tot} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P(\theta, \varphi) d\theta d\varphi \quad (W/m^2)$$

La puissance rayonnée dépend du type d'antenne. Pour le cas particulier d'une antenne isotrope (antenne qui rayonne uniformément dans toutes les directions de l'espace) appelée antenne omnidirectionnelle, les puissances sont exprimées par les équations *Eq.I.8* et *Eq.I.9*. Bien que ce type d'antenne ne soit pas physiquement réalisable, elle est utilisée comme référence pour déterminer les performances des antennes.

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_A}{4\pi} \quad (W/Sr) \quad \text{Eq.I.7}$$

$$P(R, \theta, \varphi) = \frac{P_A}{4\pi R^2} \quad (W/m^2) \quad \text{Eq.I.8}$$

- **Fonction caractéristique et diagramme de rayonnement**

En général les antennes ne sont pas isotropes. Elles rayonnent dans des directions privilégiées. Ainsi le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions. Il permet alors d'indiquer les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.

En effet, pour déterminer le diagramme de rayonnement, on trace la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$ définie par le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ sur la puissance rayonnée dans la direction privilégiée $P(\theta_0, \varphi_0)$. La figure I.4 montre la représentation graphique d'un diagramme de rayonnement d'une antenne directionnelle à 3D (a) et 2D (b).

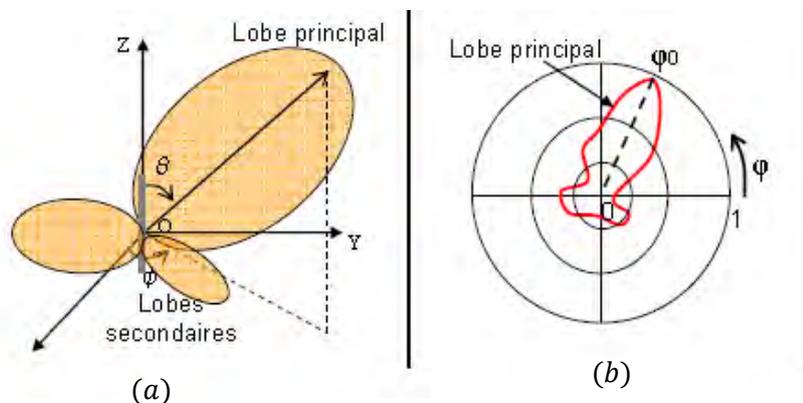


Figure I. 4: Exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne directive en 3D (a) et 2D (b)

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta_0, \varphi_0)}$$

Le diagramme de rayonnement est composé de plusieurs lobes dont le plus grand est appelé le lobe principal et les plus petits des lobes latéraux. Un lobe est défini par une portion du diagramme de rayonnement délimité par des régions d'intensité de rayonnement relativement faible [2].

- **Angle d'ouverture**

L'angle d'ouverture (*beamwidth*) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture 3dB représente la portion de l'espace dans laquelle la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les deux directions autour du lobe principal où la puissance est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal comme indique la figure I.5 [4].

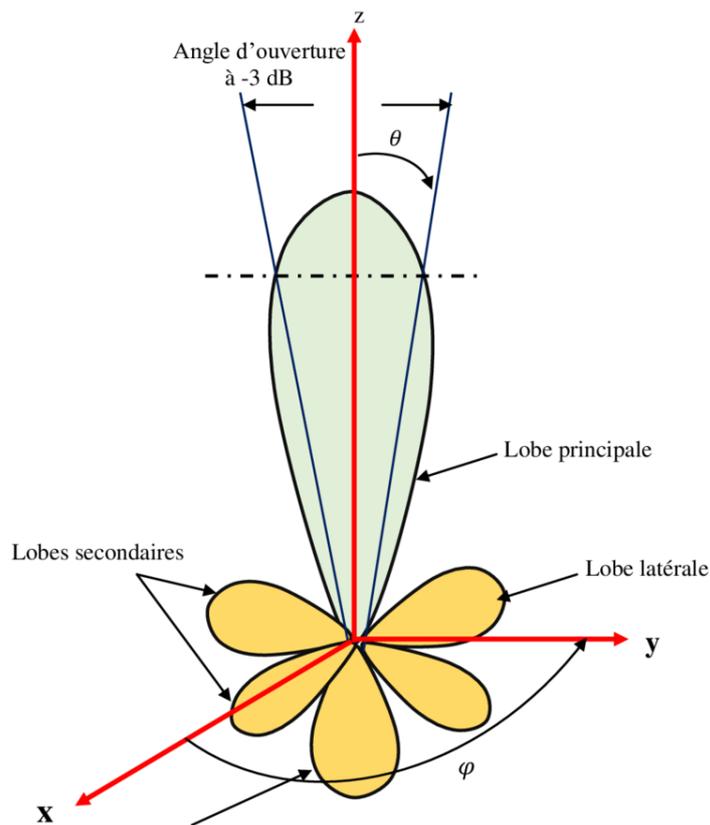


Figure I. 5: Angle d'ouverture 3 dB

- **Directivité Gain et Rendement**

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne est le rapport entre sa puissance rayonnée dans une direction et la puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope. Elle caractérise la manière dont l'antenne focalise l'énergie dans certaines directions de l'espace.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad \text{Eq. I. 10}$$

Le gain de l'antenne dans une direction $G(\theta, \varphi)$ est le rapport de la puissance rayonnée dans une direction sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans perte. En général le gain de l'antenne correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal.

Pour une antenne isotrope et sans perte on a un gain égal à 1 ou 0 dB. Le gain est exprimé généralement en dB ou dBi car l'antenne isotrope est utilisée comme référence.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_R} \quad \text{Eq.I.11}$$

Le rendement (ou efficacité) η d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique P_A sous forme de puissance rayonnée P_R . Il est défini par le rapport entre la puissance rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie par la source. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. Notons qu'il existe une relation entre le rendement, la directivité et le gain. Ce rendement peut également être exprimé en pourcentage.

$$\eta = \frac{P_R}{P_A} \quad \Rightarrow \quad G = \eta D \quad \text{Eq.I.12}$$

- **Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)**

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (EIRP en anglais) est définie comme étant la puissance électrique qu'il faut fournir à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée. Elle s'exprime par la relation suivante.

$$PIRE = G \cdot P_A \quad \text{Eq.I.13}$$

- **Adaptation d'impédance**

Une antenne est reliée à sa source par une ligne de transmission d'impédance caractéristique Z_C (en générale, $Z_C = 50 \Omega$ ou 75Ω) comme le montre la figure I.6. Pour assurer un transfert de puissance maximal entre la source et l'antenne, il est nécessaire d'assurer une adaptation d'impédance. Ceci permet d'annuler le coefficient de réflexion en entrée de l'antenne notée Γ_{in} ou S_{11} .

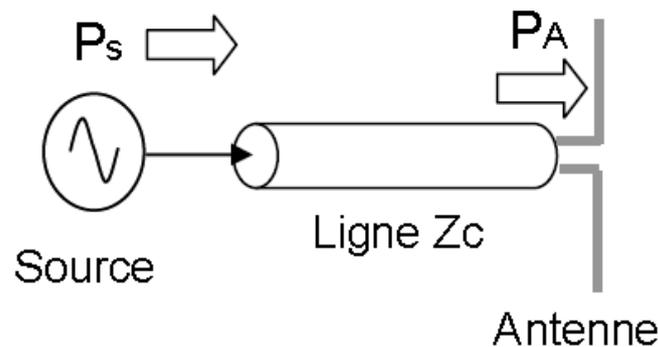


Figure I. 6 : Adaptation d'une antenne

$$\Gamma_{in} = S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_C}{Z_{in} + Z_C}$$

$$\text{Condition d'adaptation : } S_{11} = 0 \Rightarrow Z_{in} = Z_C$$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source (ou ré-rayonné par l'antenne dans le cas de la réception). Dans la pratique l'antenne est conçue de telle sorte qu'elle présente une impédance Z_A égale à l'impédance caractéristique Z_C à la fréquence de travail. On peut également placer un circuit de transformation d'impédance à l'entrée de l'antenne pour modifier son impédance d'entrée. Eq.I.14

- **Rapport d'onde stationnaire (ROS)**

Le rapport d'onde stationnaire ou *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)* en anglais) est utilisé pour caractériser une antenne lorsqu'il y a une désadaptation. Il est déterminé par le rapport entre l'amplitude maximal et l'amplitude minimal de l'onde stationnaire.

$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \quad \text{Eq.I.15}$$

- **Bande passante et facteur de qualité**

La bande passante (largeur de bande) d'une antenne est définie par la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximal. Elle peut être définie à partir de la courbe du coefficient de réflexion.

La bande passante correspond à la bande de fréquence où le diagramme de rayonnement reste inchangé ($S_{11} = -10 \text{ dB}$ ou -6 dB dans la pratique).

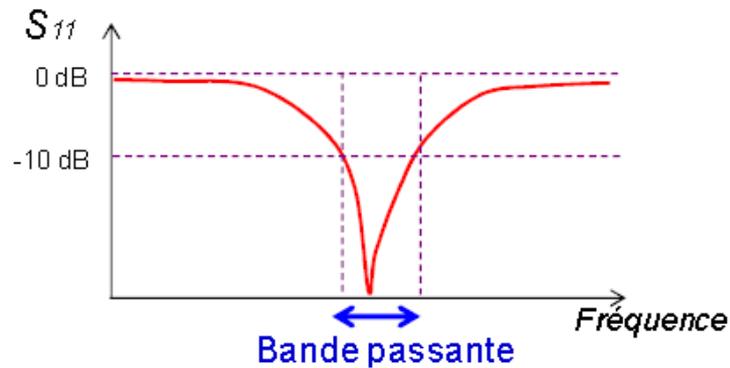


Figure I. 7: Courbe de coefficient de réflexion

Le facteur de qualité Q d'une antenne (assimilable à un circuit RLC) à la fréquence de résonance f_{res} représente la quantité de résistance présente lors de la résonance. Il peut être exprimé par les deux relations suivantes :

$$Q = \frac{f_{res}}{BW} \quad \text{Eq.I. 16}$$

Avec $BW = f_{max} - f_{min} \equiv$ largeur de la bande

$$\frac{1}{Q} = \frac{R}{2\pi f_{res} L_{ant}} \quad \text{Eq.I. 17}$$

Avec $L_{ant} \equiv$ longueur de l'antenne

Une antenne ayant un facteur de qualité élevée rayonne de manière efficace à la fréquence de rayonnement avec une bande passante étroite. Ceci permet de limiter les interférences hors bande. Alors que, si le facteur de qualité est faible l'antenne émet (reçoit) dans une large bande pouvant alors collecter du bruit présent dans la bande de fréquence de fonctionnement.

I.2. Types d'antennes utilisées par les terminaux mobiles 4G et 5G

Divers types d'antennes sont utilisées dans les communications sans fil. Cette section est consacrée à la présentation des types d'antennes utilisés par les équipements mobiles

compatibles aux systèmes 4G et 5G notamment, les antennes PIFAs (Planar Inverted-F Antenna) et les antennes imprimées (patch) en technologie micro-ruban.

I.2.1. Antennes PIFAs

Les antennes PIFAs (*Planar Inverted-F Antenna*) font partie des types d'antennes les plus utilisées dans les téléphones mobiles. Une PIFA est basée sur le même principe qu'une IFA (*Inverted-F Antenna*), qui comporte une ligne d'alimentation et un court-circuit. L'ajout du court-circuit permet d'ajuster l'impédance de l'antenne, en dimensionnant correctement la distance entre le court-circuit et le point d'alimentation. En remplaçant la piste d'une IFA par un *patch* de dimensions $L \times W$, nous obtenons une PIFA. Dans la plupart des cas, le *patch* est au-dessus du plan de masse. La dimension la plus cruciale dans une PIFA est ainsi la distance entre le plan de masse et le *patch* nommée H [6].

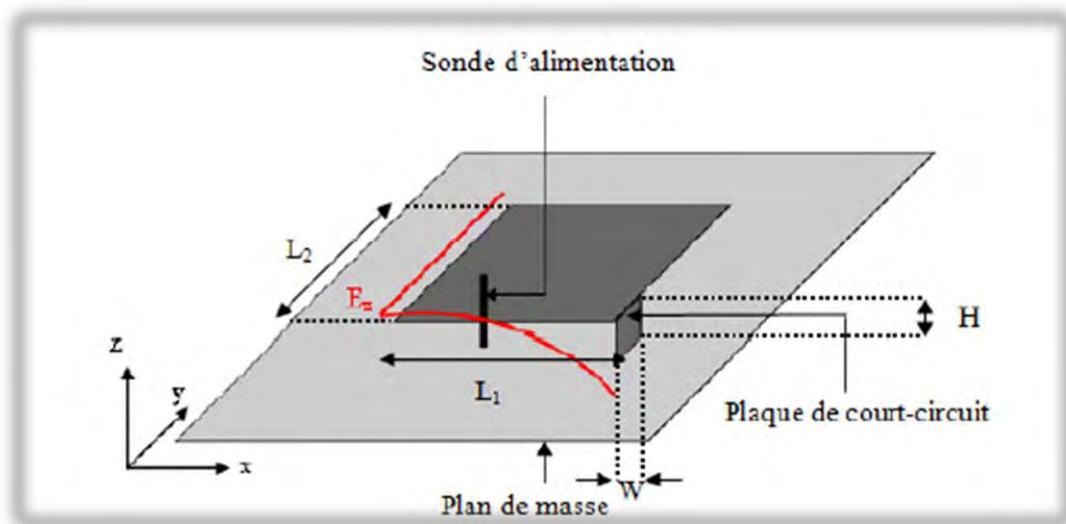


Figure I. 8: Antenne PIFA

I.2.2. Antennes patch

Les antennes imprimées (patch en anglais) sont apparues dans les années 50. Cependant, leur véritable développement ne s'est fait que vers les années 70. Les antennes patch également appelées des antennes micro ruban sont des éléments rayonnants planaire. La forme la plus simple d'une antenne patch est constituée d'un substrat d'épaisseur relativement faible, d'un plan métallique déposé sur l'une des faces du substrat appelé plan de masse. Sur l'autre face du substrat, l'élément de forme variable (rectangle, triangle...) et de dimensions ajustées est imprimé en micro ruban. Les caractéristiques du substrat déterminent entre autres la fréquence de résonance. Le plan de masse est suffisamment grand par rapport à l'élément rayonnant pour limiter les effets d'onde de surface rayonnée sur

l'extrémité du plan de masse. La figure I.9 montre les éléments constitutifs d'une antenne patch [2] [3].

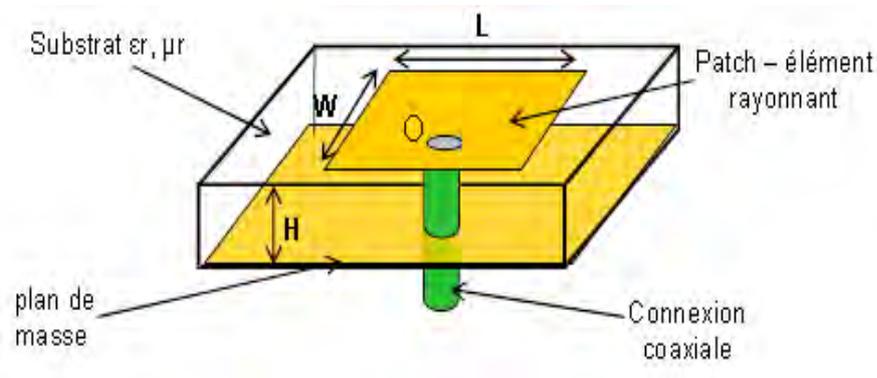


Figure I. 9: Exemple d'une antenne patch alimenté par un câble coaxial

Où L est la longueur de l'antenne, W est sa largeur et H son épaisseur

D'un point de vue pratique, l'épaisseur est généralement fine par rapport à la longueur d'onde de travail (λ_{res}). Une condition de résonance permettant le transfert maximal de puissance à l'antenne consiste à choisir la longueur L légèrement inférieure à la demi-longueur d'onde guidée λ_g dans le diélectrique ($L = 0.49\lambda_g$). Dans le cas d'une antenne patch de forme rectangulaire et dimension L et W , la fréquence de résonance d'un mode TM_{mn} dans la cavité est donnée par la relation suivante [1].

$$f_{m,n} = \frac{C}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad \text{Eq. I. 18}$$

I.2.3. Bandes de fréquences des systèmes LTE

Les bandes de fréquences sont normalisées par un organisme international appelé *International Union of Telecommunication (IUT)*. Cependant, dans chaque pays, l'allocation de fréquences est gérée par une structure nationale.

Les bandes de fréquences hertziennes prévues par les normes 3GPP pour le *LTE* et le *LTE Advanced* sont très nombreuses (plus de 30) et s'étalent de 450 MHz à 3,8 GHz. Celles situées dans la zone de 450 à 900 MHz sont utilisables sur tous les territoires et sont particulièrement adaptées aux zones rurales car elles ont une plus grande portée que les micro-ondes de fréquences plus élevées. Ces bandes de fréquences réservées pour les systèmes *LTE* opèrent en *FDD (Frequency Division Duplexing)* et en *TDD (Time Division*

Duplexing) [5]. Le tableau I.1 montre quelques bandes de fréquences utilisées dans les systèmes *LTE*, notamment en *FDD* et *TDD*.

Tableau I. 1 : Bandes de Fréquences des systèmes *LTE*

FDD					TDD		
Bandes E-UTRAN	Bandes Fréquences Up Link		Bandes Fréquences Down Link		Bandes E-UTRAN	Bandes Fréquences Up Link	Bandes Fréquences Down Link
	F_{min}	F_{max}	F_{min}	F_{max}			
1	1920	1980	2110	2170	33	1900	1920
2	1850	1910	1930	1990	34	2010	2025
3	1710	1785	1805	1880	35	1850	1910
4	1710	1755	1805	1880	36	1930	1990
5	824	849	869	894	37	1910	1930
6	830	840	875	885	38	2570	2620
7	2500	2570	2620	2690	39	1880	1920
8	880	915	925	960	40	2300	2400
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	-	-	-
10	1710	1770	2110	2170	-	-	-
11	1427.9	1452.9	1475.9	1500.9	-	-	-
12	698	716	728	746	-	-	-
13	777	787	746	756	-	-	-
14	788	798	758	758	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
17	704	716	734	746	-	-	-

I.3. Système multi-antennes

La propagation d'une onde électromagnétique est soumise à des multiples contraintes dues aux obstacles situés entre l'émetteur et le récepteur. La présence de ces obstacles crée des phénomènes de réflexions, de diffraction, de diffusion etc... Ces conditions sont à l'origine de la propagation par trajet multiple qui peut se traduire par un évanouissement de la puissance reçue. Pour les performances des systèmes d'émission-réception, les techniques de diversité et de *MIMO* ont été mises au point dans les nouveaux systèmes de communication qui sont de plus en plus puissants en termes de débit et de capacité [2] [5].

I.3.1. Diversité

Le principe de la diversité consiste à multiplier le nombre de canaux disponibles au niveau du récepteur. Autrement dit, c'est la réception du même signal par des canaux différents. Ainsi, par des méthodes de recombinaison, il est possible de reconstituer le signal avec un meilleur rapport signal sur bruit (SNR) afin d'améliorer la qualité et la fiabilité de la transmission. La figure I.10 illustre le principe de la diversité en combinant deux signaux identiques reçus par deux canaux distincts.

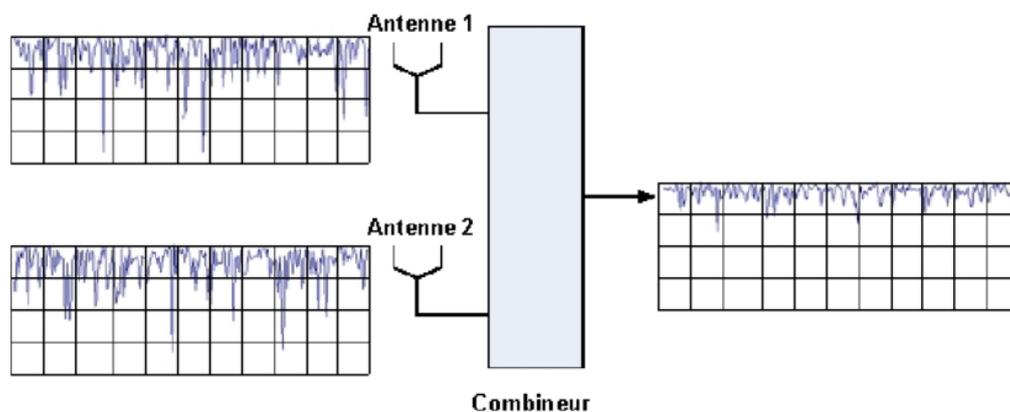


Figure I. 10: Principe de la diversité

Il existe plusieurs techniques de diversité, parmi lesquelles on peut citer : la diversité d'espace, la diversité de polarisation, la diversité de diagramme, la diversité de fréquence et la diversité de temps.

- **Diversité spatiale**

La diversité spatiale consiste à transmettre un signal par un émetteur unique vers un récepteur constitué de plusieurs antennes séparées, les unes aux autres, par une distance suffisante pour que l'évanouissement au niveau des différents canaux soit indépendant. Cette

diversité est la plus connue et la plus ancienne. Cependant elle nécessite beaucoup d'espace d'où ses limites car les appareils sont de plus en plus miniatures.

- **Diversité de polarisation**

Dans la diversité de polarisation, on utilise des antennes à polarisation différentes. Au cours de la propagation, l'onde subit diverses modifications selon la nature de l'environnement. Ainsi, on note l'apparition d'une composante orthogonale à la polarisation principale qui possède une statistique d'évanouissement indépendante de celui de la polarisation principale. La taille du système antenne est alors réduite par rapport à la diversité spatiale.

- **Diversité de diagramme**

La diversité de diagramme encore appelée diversité angulaire consiste à utiliser des antennes ayant des diagrammes de rayonnement différents. En général, pour réduire l'encombrement, il est préférable d'utiliser des antennes intelligentes capables de commuter électroniquement les diagrammes de rayonnement émis/reçus pour les orienter vers la direction qui présente le SNR le plus élevé.

- **Diversité fréquentielle**

La diversité de fréquence consiste à émettre un signal en utilisant deux fréquences de porteuse différente de sorte que les statistiques d'évanouissement des signaux reçus soient indépendantes. Cette technique de diversité est adaptée dans le cas où le canal est sélectif en fréquence.

- **Diversité temporelle**

La diversité temporelle consiste à émettre les mêmes signaux à des intervalles de temps différents. Ces intervalles de temps sont en fonction du taux d'affaiblissement et de la vitesse du déplacement de la station mobile. Cependant, l'efficacité de la diversité en temps est limitée lorsque la station mobile n'est pas en mouvement.

I.3.2. Systèmes MIMO

Le sigle *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*) représente les systèmes dans lesquels, plusieurs antennes sont utilisées en émission ainsi qu'à la réception. Les systèmes classiques de transmission sont composés d'une antenne en émission et en réception. Un tel système est

appelé système *SISO* (*Single Input Single Output*) dont la capacité est limitée dans un canal à trajet multiple. Alors que les nouveaux systèmes sont de plus en plus performants et demandent plus de capacité et de débits dans les transmissions. C'est ainsi qu'il a été envisagé, dans un premier temps, d'augmenter la bande passante et le niveau de puissance. Or, la limitation du spectre de fréquence disponible et la variation de l'environnement de propagation constituent des contraintes pour ces techniques. Ainsi les travaux effectués dans ce domaine ont permis de montrer qu'il est possible, en augmentant le nombre d'antenne à l'émission et à la réception, d'améliorer le débit et la capacité d'un système de transmission sans augmenter la bande passante ni le niveau de puissance. La figure I.11 représente un système *MIMO* ayant N antenne en émission et M antenne en réception.

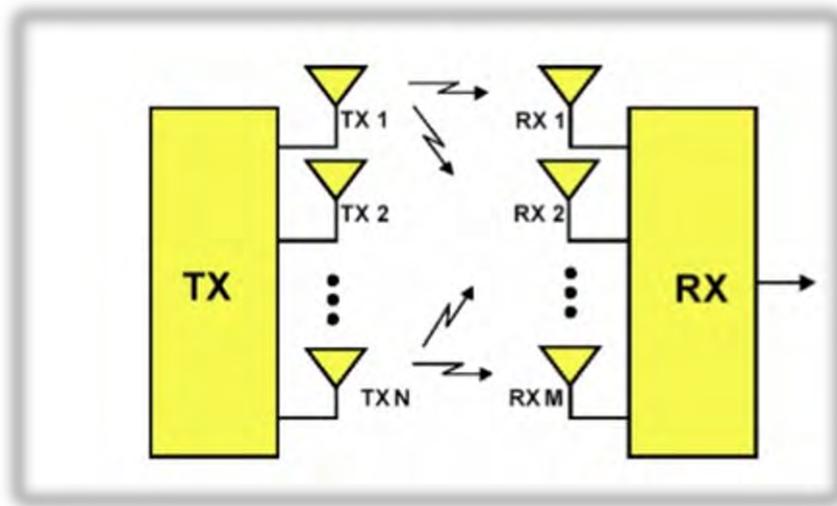


Figure I. 11: Principe d'un système MIMO

Par ailleurs, il est possible d'améliorer considérablement la capacité d'un canal par un système dans lequel on a une seule antenne en émission et plusieurs antennes en réception appelé système *SIMO* (*Single Input Multiple output*) ou inversement. Ce dernier cas de figure est appelé système *MISO* (*Multiple Input Single Output*). Dans la figure I.12, nous avons une représentation des quatre principes d'un système de transmission multi antennes.

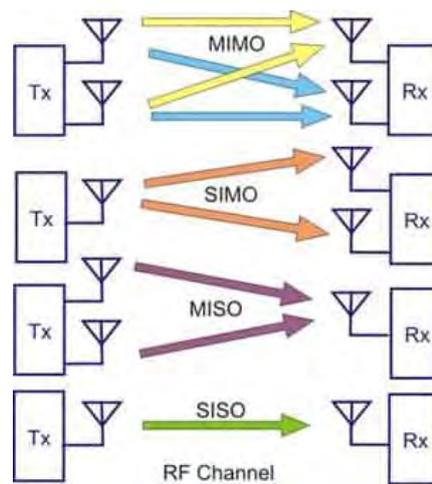


Figure I. 12 : Différents principes d'un système de transmission

I.4. Antennes reconfigurables

Les antennes reconfigurables ont vu le jour à la fin du XX^e siècle. Une reconfiguration de paramètres d'antennes est définie comme la capacité à modifier une ou plusieurs caractéristiques fondamentales de l'antenne soit par un moyen électronique ou mécanique. La reconfiguration peut être obtenue par diverses techniques [6]. Il est possible donc d'utiliser les diodes PIN (Positif Intrinsèque Négatif), les diodes *Varicap* (*Variable Capacity*), les *MEMS* (*Micro Electro Mechanical System*) qui sont des éléments actifs ainsi que d'autres techniques pour faire de la reconfiguration des paramètres de l'antenne comme la fréquence, le diagramme de rayonnement et la polarisation. Chaque technique de reconfiguration correspond à une ou plusieurs types de reconfiguration selon le besoin et les contraintes [6] [7].

I.4.1. Types de reconfigurations

La reconfiguration des paramètres d'antennes joue un rôle important dans les dispositifs électroniques actuels et futurs. Dans cette section nous allons présenter quelques types de reconfiguration.

I.4.1.1. Reconfiguration de fréquence

La reconfiguration d'antenne en fréquence consiste à faire varier la fréquence discrètement en modifiant la longueur électrique de l'antenne (diode PIN, *MEMS*) ou de manière continue en jouant sur la bande passante (diodes *Varicap*).

I.4.1.2. Reconfiguration de diagramme de rayonnement

La reconfiguration d'antenne en diagramme s'effectue en modifiant la forme ou la direction du rayonnement dans le but d'atteindre ou d'éviter certaines directions, mais également pour éviter les sources de bruit, améliorer la sécurité et économiser l'énergie en changeant la directivité vers les utilisateurs visés.

I.4.1.3. Reconfiguration de polarisation

Ce type de reconfiguration correspond à la modification de la polarisation de l'antenne, de façon linéaire (verticale ou horizontale) ou circulaire (droite ou gauche). L'objectif principal est la modification de l'orientation du champ électrique émis et cela sans changer ni la fréquence de fonctionnement ni la forme du diagramme de rayonnement. Cette reconfigurabilité a été utilisée pour atténuer les phénomènes d'évanouissement des signaux dus aux propagations multi-trajets. Il peut également être utilisé pour réaliser la réutilisation de fréquences afin de résoudre le problème de la rareté du spectre *RF*.

Toutefois, la combinaison de plusieurs types de reconfiguration dans un seul système antennaire permet de construire un système innovant et plus performant en terme d'amélioration de qualité du signal, de réduction des interférences et les phénomènes d'évanouissement, et surtout de surmonter le problème de la rareté du spectre *RF*.

I.4.2. Techniques de Reconfigurations

Les techniques de reconfiguration sont nombreuses et varient en fonction des paramètres spécifiques dont on souhaite modifier. Cependant, cette section fera l'objet d'une présentation de quelques techniques de reconfiguration telle que l'utilisation des Diodes PIN, des *MEMS* et des diodes varicap [7].

I.4.2.1 Diodes PIN

La diode PIN (Positive Intrinsic Negative) est un composant à semi-conducteur pouvant être utilisé comme un interrupteur pour les signaux de hautes fréquences. En fait, lorsqu'une diode PIN est polarisée en directe, elle se comporte comme un circuit fermé (état ON) due à son impédance relativement faible. Mais une polarisation en inverse offre une impédance très

élevée en parallèle avec une faible inductance, elle se comporte alors comme un circuit ouvert (état OFF).

Dans un circuit planaire, une diode placée sur le chemin de propagation de l'onde hyperfréquence a la possibilité de laisser passer le signal (polarisation directe) ou de s'opposer au passage du signal (polarisation inverse). La figure I.13 montre le symbole (a) et les circuits équivalents d'une diode PIN à l'état ON (b) et à l'état OFF (c).

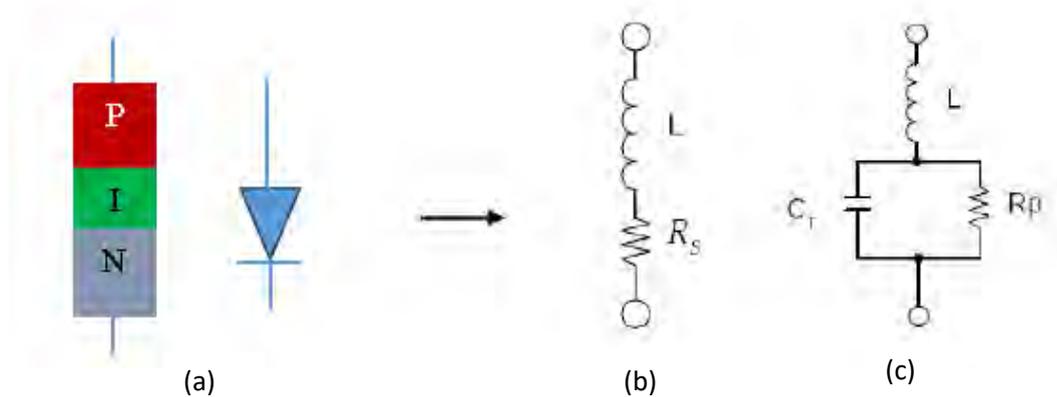


Figure I. 13: Symbole et circuits équivalents d'une diode PIN aux états ON et OFF

I.4.2.2 RF-MEMS

Un MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) est un composant RF microsystème qui permet d'obtenir un court-circuit ou un circuit ouvert dans une ligne de transmission par une déformation de microstructures (plus souvent des micro-membranes). Le principe de fonctionnement des MEMS repose sur un mouvement mécanique de l'ensemble, régi par les lois de l'électrostatique, de la magnétostatique ou de la thermodynamique [7]. Dans la figure I.14 [8], nous présentons le schéma d'un RF-MEMS à l'état OFF (a) et l'état ON (b).

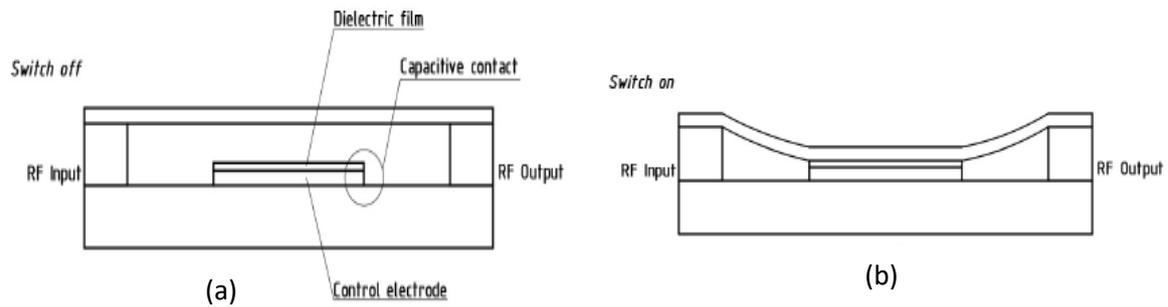


Figure I. 14: Exemple d'un RF-MEMS à l'état OFF (a) et l'état ON (b)

I.4.2.3 Diode Varicap

Les diodes *varicap* (*variable capacitor*) est une diode qui peut se comporter comme un condensateur dont la capacité peut être contrôlée, en appliquant une tension inverse à ses bornes. Contrairement à la diode PIN qui offre une variation discrète, la diode *varicap* permet une variation continue en fonction de la tension de polarisation. La figure I.15 montre le symbole (a) et le circuit équivalent (b) d'une diode *varicap*.

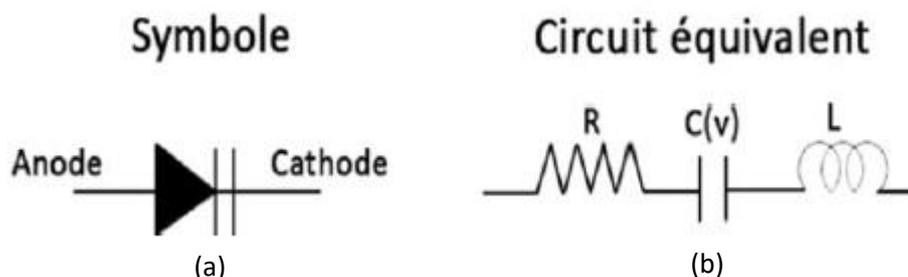


Figure I. 15: Symbole et circuit équivalent d'une diode varicap

I.5. Présentation d'un système MIMO 4×4 (système 1)

Cette section est consacrée à la présentation d'un système d'antenne MIMO 4×4 que nous appellerons dans la suite de ce mémoire le **système 1**. Il s'agit d'un système d'antenne multiple imprimé composé d'un plan de masse, d'un substrat, et les éléments rayonnants. Chaque élément rayonnant est alimenté par un port d'excitation relié à l'antenne par une ligne

de transmission micro-ruban [9]. Ce système, conçu pour un terminal mobile compatible au système 4G et 5G qui fonctionne sur deux fréquences centrales $f_1 = 2.6$ GHz (B_1) et $f_2 = 3.6$ GHz (B_2), occupe un volume total de $120 \times 50 \times 0.87$ mm³.

I.5.1. Design du système 1

En effet, le plan de masse ($92 \times 50 \times 0.035$ mm³) du système, constitué du cuivre, est placé de manière centrée sur la face inférieure du substrat. Ce dernier est du FR_4 epoxy ($\epsilon_r = 4.4$) dont le volume est égal à $120 \times 50 \times 0.8$ mm³. Les éléments rayonnants identiques sont imprimés sur les quatre coins de la face supérieure du substrat ainsi que des éléments parasites sur la face inférieure. Chaque élément rayonnant est constitué par un brin en forme C (3.6 GHz) à l'intérieur duquel se trouve un brin replié (2.6 GHz). Ainsi le volume occupé par un élément rayonnant du système est égal à $14.5 \times 10.5 \times 0.035$ mm³. Les lignes de transmission ont une longueur de 8 mm et une largeur égale à 1.5 mm

Les figures I.16, I.17 et I.18 illustrent la représentation topologique du système 1 vue sous différents angles.

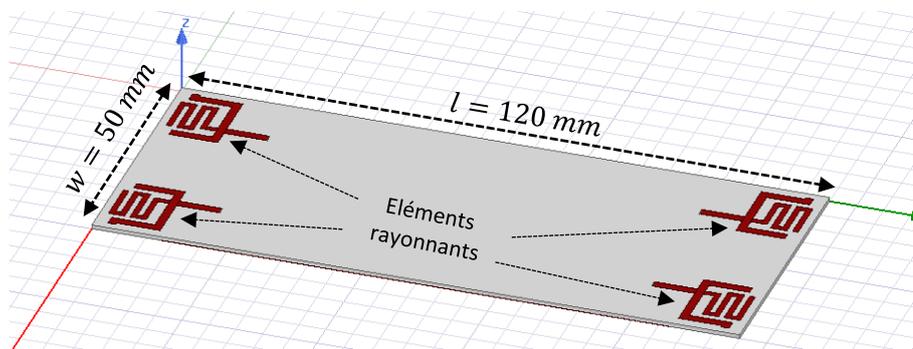


Figure I. 16: Système 1 en 3D

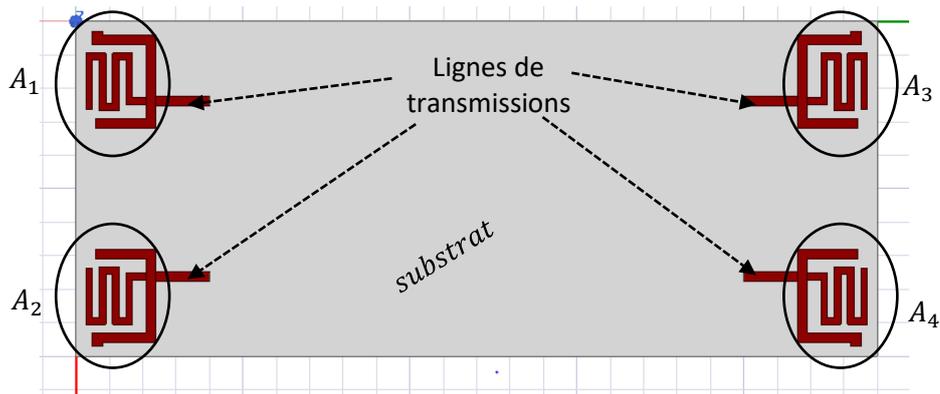


Figure I. 17: Vue de dessus du système 1

I.5.2. Résultats de la simulation du système 1

Dans cette partie, nous nous intéressons aux résultats de la simulation du système, notamment, aux paramètres d'entrée et au gain total en fonction des états du système.

Pour la détermination des paramètres d'entrée du système, nous pouvons utiliser la courbe du coefficient de réflexion S_{11} (Γ_{in}). Le coefficient de réflexion permet de déterminer, entre autres, la fréquence de résonance, la bande passante, le rapport d'onde stationnaire. La figure I.19 est une représentation de la courbe S_{11} du système. Notons, par ailleurs, le

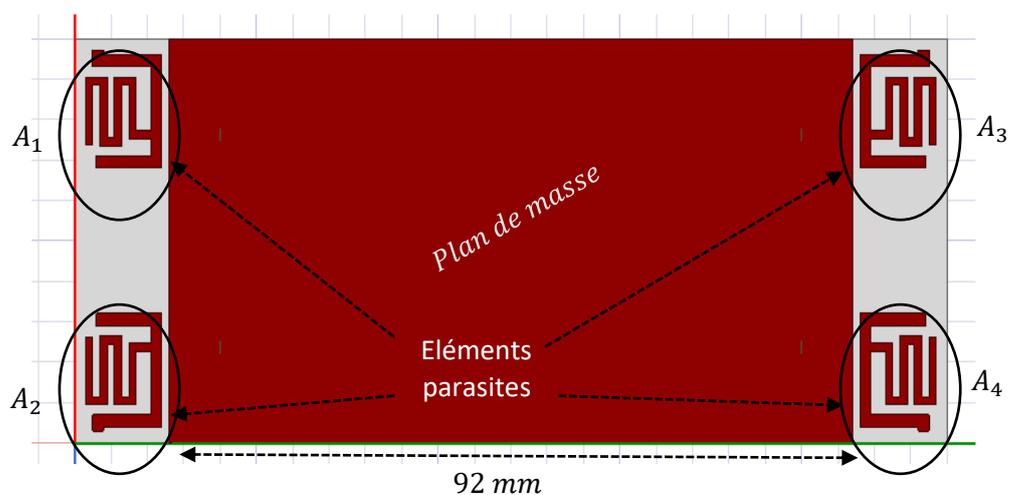


Figure I. 18: Vue de dessous du système 1

système 1 étant symétrique, les coefficients de réflexion S_{ii} sont identiques au niveau des quatre entrées.

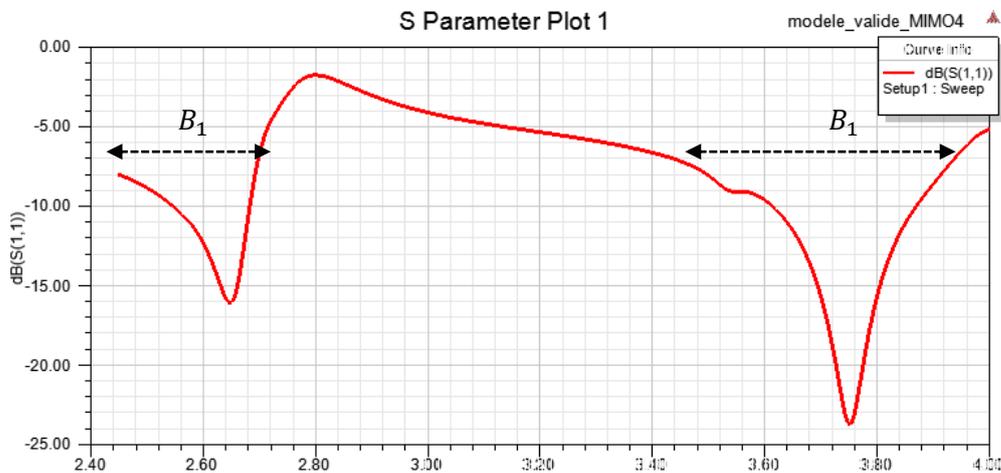


Figure I. 19: Courbe représentative du coefficient de réflexion du système 1

La figure I.19 montre le coefficient de réflexion du système 1. On note une entière couverture des bandes B_1 et B_2 à -6 dB. La bande B_1 occupe 400 MHz allant de 2.4 à 2.8 GHz. La bande B_2 occupe 500 MHz allant de 3.4 GHz à 3.9 GHz. Le système résonne à 2.65 GHz dans la bande B_1 et à 3.75 GHz dans la bande B_2 . L'adaptation dans les deux bandes B_1 et B_2 est respectivement de -15 dB et -24 dB.

Les figures I.20-I.25 suivantes montrent le diagramme de rayonnement du système en fonction de φ . Les ports 1 et 2 ont un déphasage de $\pm 90^\circ$ d'une part, et les ports 3 et 4 sont également déphasés de $\pm 90^\circ$, d'autre part.

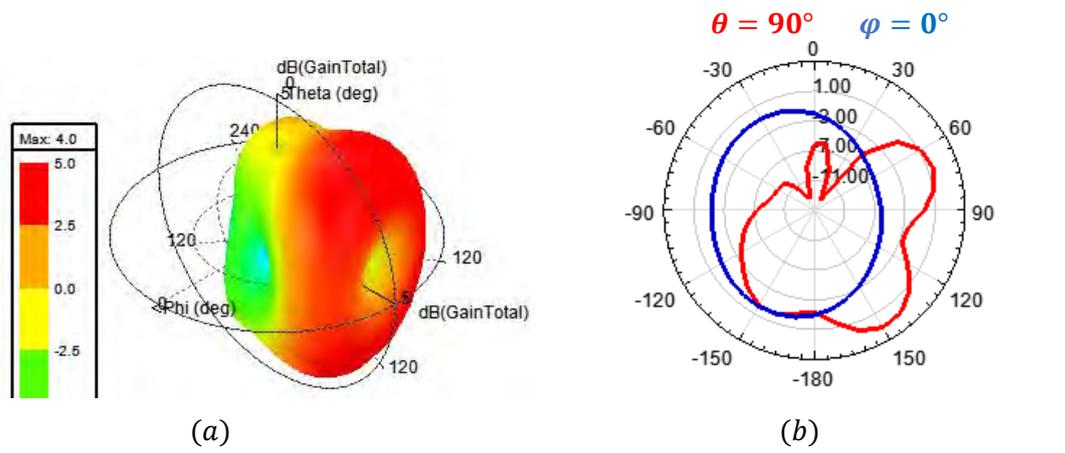


Figure I. 20: Diagramme de rayonnement en f_1 : les ports 1-2 excités (déphasage de 90° au port 2)

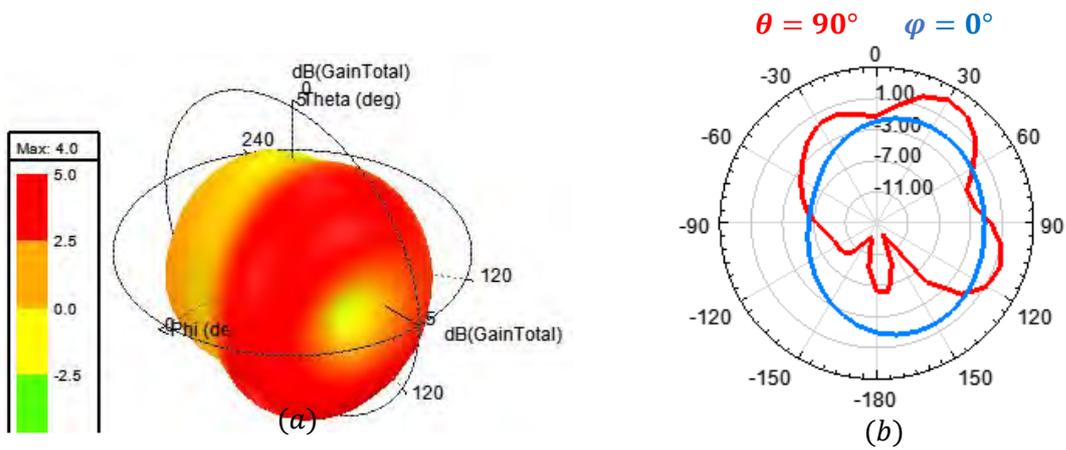


Figure I. 21: Diagramme de rayonnement en f_1 : les ports 1-2 excités (déphasage de 90° au port 1)

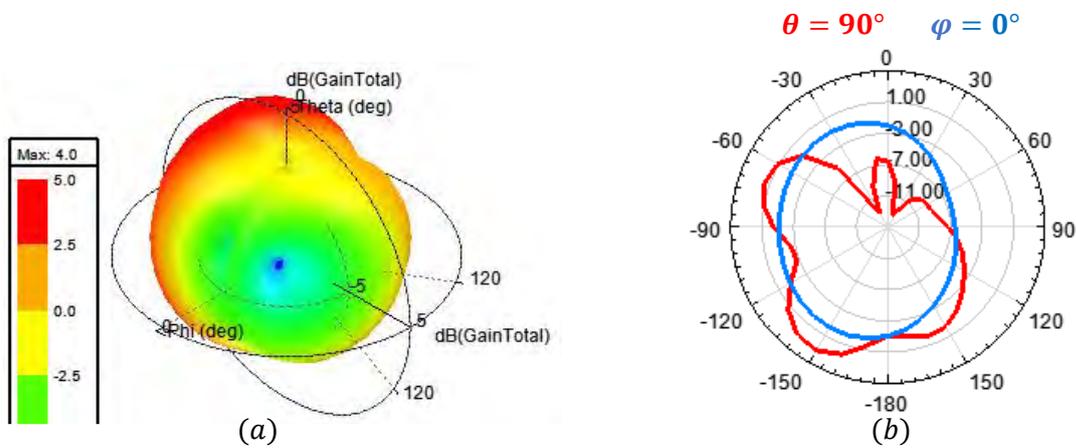


Figure I. 22: Diagramme de rayonnement en f_1 : les ports 3-4 excités (déphasage de 90° au port 4)

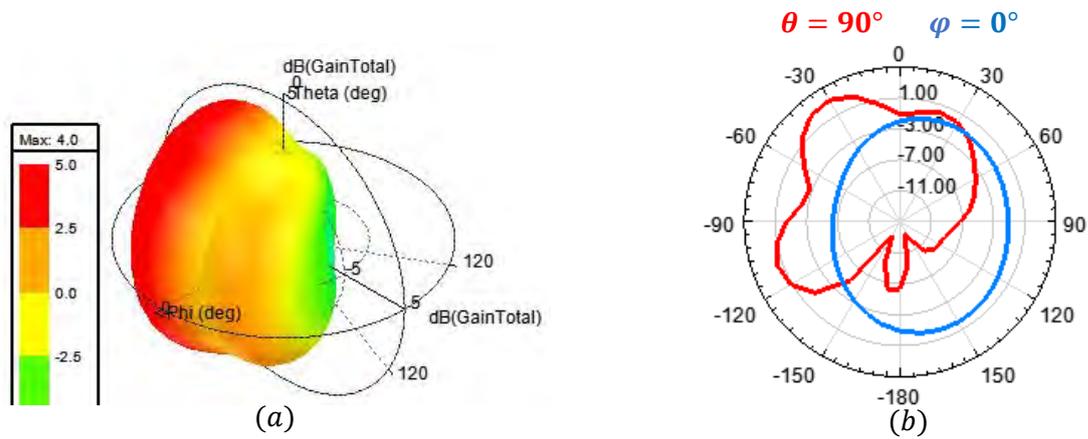


Figure 1. 23: Diagramme de rayonnement en f1 : les ports 3-4 excités (déphasage de 90° au port 3)

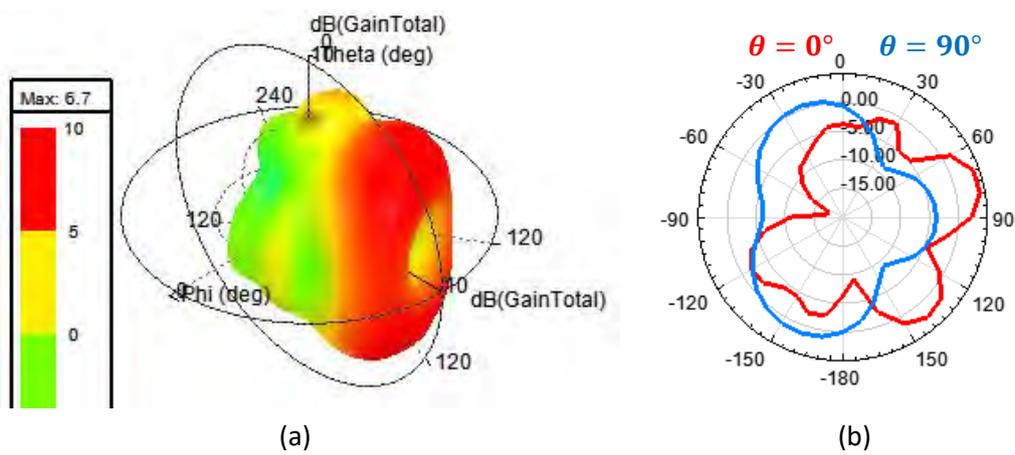


Figure 1. 24: Diagramme de rayonnement en f2 : les ports 1-2 excités (déphasage de 90° au port 2)

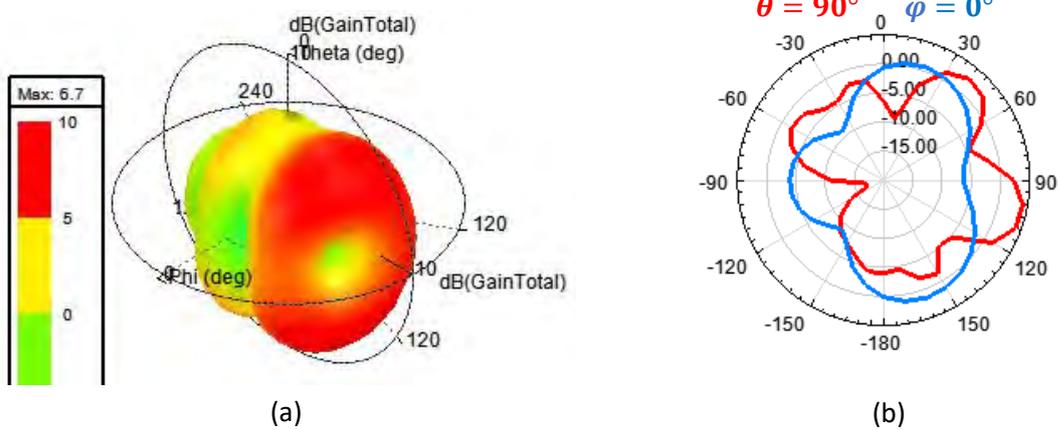


Figure 1.25: Diagramme de rayonnement en f_2 : les ports 1-2 excités (déphasage de 90° au port 1)

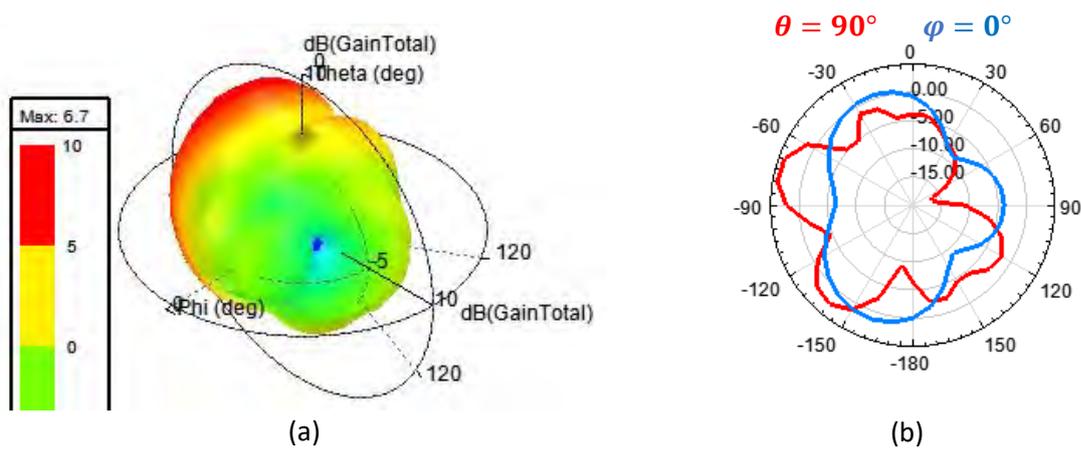


Figure 1.26: Diagramme de rayonnement en f_2 : les ports 3-4 excités (déphasage de 90° au port 4)

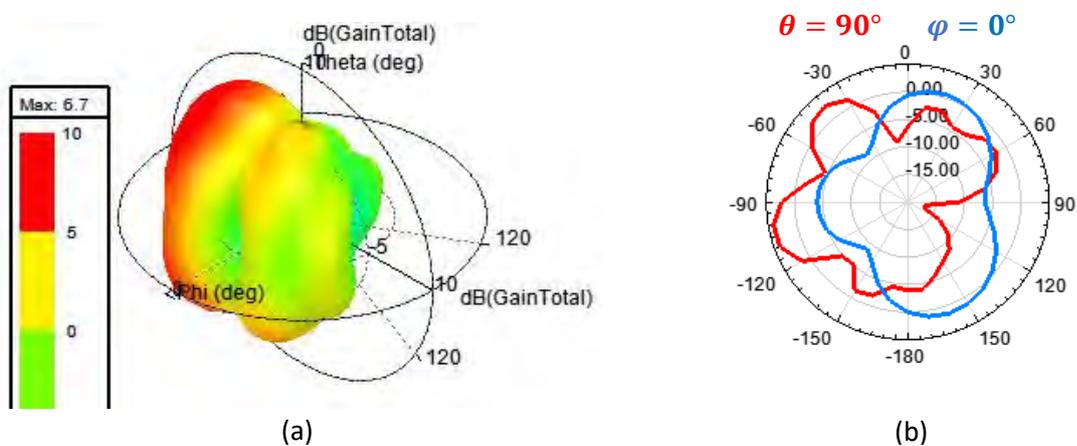


Figure 1.27: Diagramme de rayonnement en f_2 : les ports 3-4 excités (déphasage de 90° au port 3)

Les figures I.20-I.23 montrent différentes possibilités de reconfiguration en diagramme de rayonnement du système 1 simulé à la fréquence f_1 . En excitant les ports 1-2 avec déphasage de 90° (au port 2), on obtient la configuration de la figure I.20 qui couvre le plan $(-X ; Y)$ à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal de cette configuration est égal à 4.0 dB correspondant à $\varphi = 150^\circ$. Le diagramme de rayonnement de la figure I.21 est obtenu en excitant les ports 1-2 avec un déphasage de 90° au port 1. On couvre le plan $(X ; Y)$ à $\theta = 90^\circ$. On obtient alors un gain maximal égal à 4.0 dB qui correspond à $\varphi = 30^\circ$. En excitant les ports 3-4 avec un déphasage de 90° (port 4), on obtient la configuration de la figure I.22 où le plan $(-X ; -Y)$ est couvert à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal obtenu est 4.0 dB à $\varphi = -150^\circ$. Le diagramme de rayonnement de la figure I.23 est obtenu en excitant les ports 3-4 avec un déphasage de 90° (au port 3). On obtient une couverture suivant le plan $(X ; -Y)$ à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal est de 4.0 dB qui correspond à $\varphi = -30^\circ$.

Les figures I.24-I.27 montrent différentes possibilités de reconfiguration en diagramme de rayonnement du système 1 à la fréquence f_2 . En excitant les ports 1-2 avec un déphasage de 90° (au port 2), on obtient la configuration de la figure I.24 qui couvre le plan $(-X ; Y)$ à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal de cette configuration est égal à 6.7 dB correspondant à $\varphi = 145^\circ$. Le diagramme de rayonnement de la figure I.25 est obtenu en excitant les ports 1-2 avec un déphasage de 90° (au port 1). On couvre le plan $(X ; Y)$ à $\theta = 90^\circ$. On obtient alors un gain maximal égal à 6.7 dB qui correspond à $\varphi = 40^\circ$. En excitant les ports 3-4 avec un déphasage de 90° (au port 4), on obtient la configuration de la figure I.26 où le plan $(-X ; -Y)$ est couvert à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal obtenu est 6.7 dB à $\varphi = -145^\circ$. Le diagramme de rayonnement de la figure I.27 est obtenu en excitant les ports 3-4 avec un déphasage de 90° (au port 4). On obtient une couverture suivant le plan $(X ; -Y)$ à $\theta = 90^\circ$. Le gain maximal est de 6.7 dB qui correspond à $\varphi = -40^\circ$.

Dans les tableaux I.2-I.3 suivants, nous allons récapituler les valeurs maximales des gains et des directivités du système 1.

Tableau I. 1: Caractéristiques de rayonnement du système 1 en f_1

Etats du système	Gain max G (dB)	Directivité max D (dB)
Port 1 (90°) et 2 excités Port 1 et 2 (90°) excités	4.1	4.9
Ports 3 (90°) et 4 excités Ports 3 et 4 (90°) excités	4.0	4.9

Tableau I. 2: Caractéristiques de rayonnement du système 1 en f_2

Etats du système	Gain max G (dB)	Directivité max D (dB)
Port 1 (90°) et 2 excités Port 1 et 2 (90°) excités	6.7	7.2
Ports 3 (90°) et 4 excités Ports 3 et 4 (90°) excités	6.7	7.2

Les états de reconfiguration présentés dans cette section ont été simulés sous *HFSS*. Nous avons choisi ces états dans le but d'obtenir un système antennaire reconfigurable qu'on peut réaliser physiquement. Pour ce faire nous utiliserons des coupleurs hybrides (-3 dB, 90°).

Conclusion

Les systèmes d'émission/réception jouent un rôle incontournable dans les réseaux sans fil pour la transmission des informations. Parmi ces systèmes, les antennes sont les plus répandues dues à la diversité des applications dans lesquelles elles interviennent. L'évolution de la technologie a permis de passer des types d'antennes simples aux antennes de plus en plus complexes. Cette évolution est conditionnée par les besoins de transferts des données à hauts débits.

Après avoir fait une étude générale sur les antennes ainsi que les antennes intégrées dans les équipements mobiles compatible aux systèmes 4G et 5G, nous avons rappelé les techniques utilisées pour améliorer les performances des systèmes multi-antennes. Enfin la reconfiguration des paramètres d'antennes a été développée.

Dans le chapitre suivant, nous ferons une présentation générale sur la théorie des coupleurs directionnels et plus particulièrement les coupleurs hybrides.