

## I.1 Introduction:

Nous baignons dans une mer invisible d'ondes électromagnétiques, en permanence, et dans toutes les directions de l'espace, elles transportent une énergie dont la provenance est variée : télévision, radio, réseaux de téléphonie mobile. Cette incessante cacophonie électromagnétique limite de façon notable, notre capacité à envoyer et à recevoir de l'information. Plus nous communiquons, plus les interférences de ces ondes radio se multiplient et, pour vaincre le vacarme du bruit de fond électromagnétique, nous devons amplifier les signaux radio émis. Ce faisant, nous renforçons les interférences.

La clé du problème se trouve peut-être dans une nouvelle classe d'antennes qui réduiraient les interférences. Alors qu'une antenne classique diffuse les conversations personnelles dans toutes les directions, ces antennes détectent précisément la position des utilisateurs et délivrent des signaux uniquement dans leur direction. De plus, elles peuvent optimiser la réception d'une communication en provenance d'un mobile, tout en minimisant les interférences avec d'éventuels signaux venant d'autres télécommunications. Ces antennes d'un nouveau genre sont connues sous le nom générique d'antennes adaptatives (ou intelligentes). Parmi elles, les plus performantes sont les réseaux d'antennes adaptatives, qui combinent plusieurs panneaux multi antennes et de puissants logiciels. Pouvant être intégrés dans un réseau de télécommunication déjà existant, ou bien développés pour de nouveaux réseaux, ces réseaux d'antennes adaptatives devraient augmenter la qualité des télécommunications sans fils, tout en réduisant le coût d'exploitation. Capables de recevoir et de transmettre de grandes quantités de données, ils pourraient devenir le pivot des communications Internet sans fils [2].

## I.2 Les réseaux d'antennes

Une antenne rayonne un diagramme à large ouverture peut être réalisée avec un seul élément rayonnant. Cette solution s'avère insuffisante pour accomplir des fonctions complexes comme le balayage électronique, la conformation en temps réel du diagramme de rayonnement ou encore le pointage électronique [3], de telles performances requièrent l'association en réseau des éléments rayonnants.

Alors, pour que le diagramme de rayonnement d'une antenne puisse être contrôlable, celle-ci doit être nécessairement équipée de plusieurs sources élémentaires, un dispositif d'alimentation (répartiteur de faisceaux) permet la répartition de l'énergie vers les différentes sources en agissant sur leurs amplitudes et leurs phases relatives [4].

Grâce à cette commande des sources en amplitude et / ou phase, les antennes réseaux peuvent produire des diagrammes de rayonnement ayant une forme voulue dans les directions désirées,

par exemple par la création d'un lobe dans la direction du signal utile et un zéro dans la direction du signal interférent (antennes adaptatives) ou création de plusieurs lobes simultanément en direction de plusieurs utilisateurs (antennes à faisceaux conformés). On peut aussi agir sur la direction du faisceau rayonné en faisant varier les phases relatives des sources (antennes à balayage). Les réseaux d'antennes peuvent avoir différentes géométries figure I.1 : réseaux linéaires, réseaux planaires et réseaux circulaires.

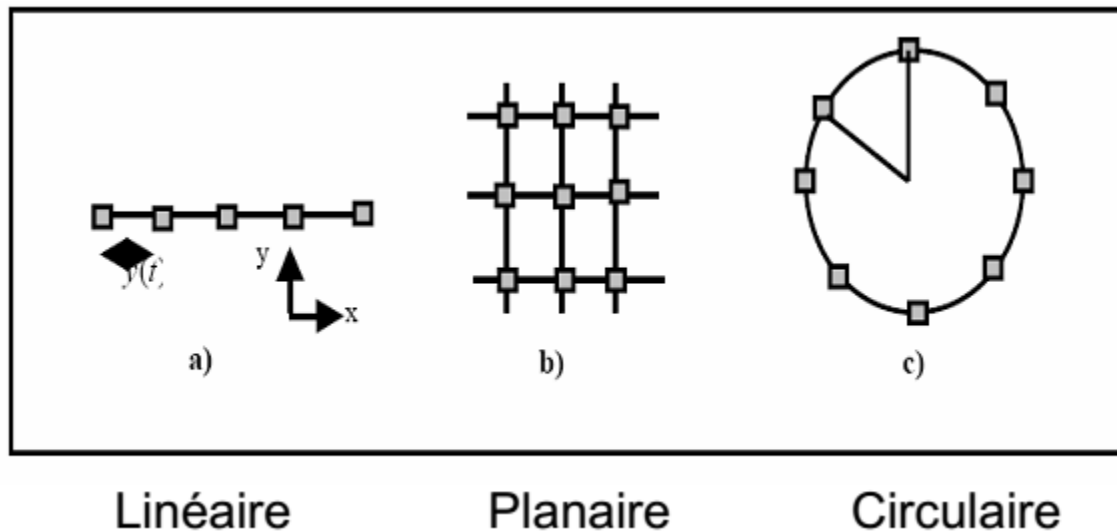


Figure I.1 : Différents configurations du réseau d'antennes

## I.3 Systèmes d'antennes intelligentes

### I.3.1 Définition

Les systèmes à antennes adaptatives ou intelligentes (smart antennas) [5] entrent dans un domaine technologique multidisciplinaire dont la croissance a été très importante dans le courant de ces dernières décennies. Ils bénéficient des interactions croissantes entre l'électromagnétisme et le traitement de signal. L'intérêt de ces systèmes est leur capacité à réagir automatiquement, en temps réel, à des modifications du canal de propagation. Ils permettent de réduire les niveaux des lobes secondaires existants dans la direction de l'interférence, tout en maintenant le lobe principal en direction utile [6].

Habituellement, ces systèmes reposent sur des réseaux d'antennes et sur un processeur récepteur adaptatif temps réel qui attribue des poids aux éléments de le réseau d'antenne afin d'optimiser le signal de sortie selon des algorithmes de contrôle prédéfinis. Un réseau d'antennes adaptatives peut donc être défini comme un réseau capable de modifier son diagramme de rayonnement, sa réponse fréquentielle

et d'autres paramètres grâce à une boucle à retour de décision interne pendant le fonctionnement de l'antenne.

Dans les systèmes d'antennes traditionnels, chaque émetteur envoie son signal de façon très large principalement à cause du fait que la position du récepteur est inconnue [7]. Ce type de transmission pollue l'environnement électromagnétique en augmentant le niveau d'interférence global par une émission de puissance dans des directions inutiles. A contrario, les systèmes à antennes intelligentes déterminent la localisation du mobile pour se focaliser et émettre l'énergie uniquement dans les directions souhaitées.

### **I.3.2 Concept d'antennes intelligentes**

Les deux systèmes d'antenne (omnidirectionnelles et directionnelles) ont été utilisés dans le cadre des systèmes des réseaux terrestres et ne sont pas adaptés au contexte satellite. Les systèmes à antennes intelligentes [4] entrent dans un domaine technologique multidisciplinaire dont la croissance a été très importante dans le courant de ces dernières décennies. Ils bénéficient des interactions croissantes entre l'électromagnétisme et le traitement de signal. L'intelligence de ces antennes est traduite par :

1. Une électronique pilotée par un système radio logiciel performant associé à des antennes capables de ne pas arroser n'importe où et n'importe comment.
2. Un système qui repose sur la technique des réseaux d'antennes et sur un processeur récepteur adaptatif temps réel qui attribue des poids aux éléments du réseau d'antenne afin d'optimiser le signal de sortie selon des algorithmes de contrôle prédéfinis. Et comme elle se base sur la technique des réseaux d'antennes, elle rend possible la modification du diagramme de rayonnement.
3. Une technique qui permet de réduire les niveaux des lobes secondaires existants dans la direction de l'interférence, tout en maintenant le lobe principal en direction utile au lieu de diffuser dans toutes les directions.

Ces systèmes dits «intelligents» offrent une amélioration de la capacité, de la qualité de transmission, du rapport signal à bruit plus interférences. Elles constituent donc l'ultime solution qui permettra d'augmenter significativement les débits [8]. A ce jour, la technologie des antennes intelligentes est un gisement de performances encore largement inexploité ou mal exploité.

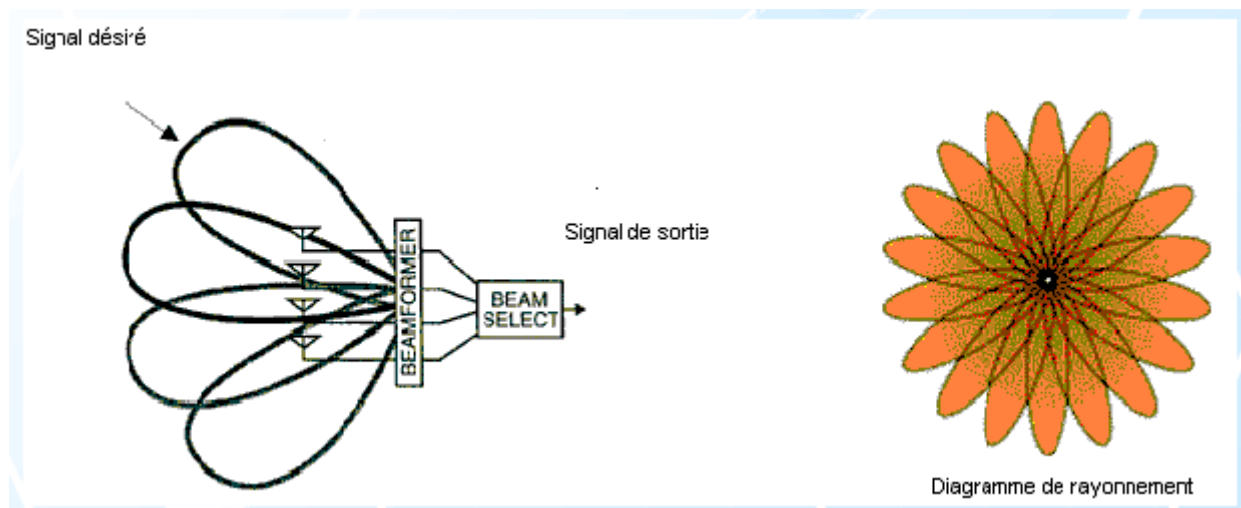
### **I.3.3 Types des antennes intelligentes**

Il existe deux types de systèmes des antennes intelligentes: les systèmes à faisceaux commutés (switched Beam, SBA) et les systèmes des réseaux d'antennes adaptatives (adaptive array antennas).

Les deux types de systèmes permettent d'augmenter le gain en fonction de la localisation de l'utilisateur. Cependant, seul le système adaptatif permet d'obtenir un gain optimal par identification, suivi et minimisation de l'interférence des signaux. C'est la stratégie du système adaptatif et les gains additionnels qui permettent d'obtenir des performances substantielles et une flexibilité par rapport à l'approche plus passive de la commutation de rayon.

### I.3.3.1 Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux

Le concept de commutation de rayon est une extension de la méthode de sectorisation cellulaire actuelle dans laquelle un site de cellules comprend par exemples trois macro- secteurs de 120 degrés. L'approche à commutation de rayon divise les macro- secteurs en plusieurs micro- secteurs. Chaque micro- secteur contient un motif prédéterminé de rayons fixes ayant une sensibilité maximale localisée au centre de rayon et une sensibilité moindre ailleurs. Dans ce type de système, des diagrammes de rayonnement déterminés avant le déploiement sont sélectionnés pendant l'opération. Quand un mobile entre dans un macro- secteur particulier, le système sélectionne le micro- secteur contenant le signal le plus puissant. Pendant l'appel, le système écoute la puissance de signal et la commute vers d'autres micro- secteurs fixes quand c'est nécessaire. Le réseau de système de SBA est relativement simple à mettre en application, exigeant seulement un réseau d'alimentation de sources (Network beam forming), un commutateur RF, et une commande logique pour choisir un faisceau spécifique.



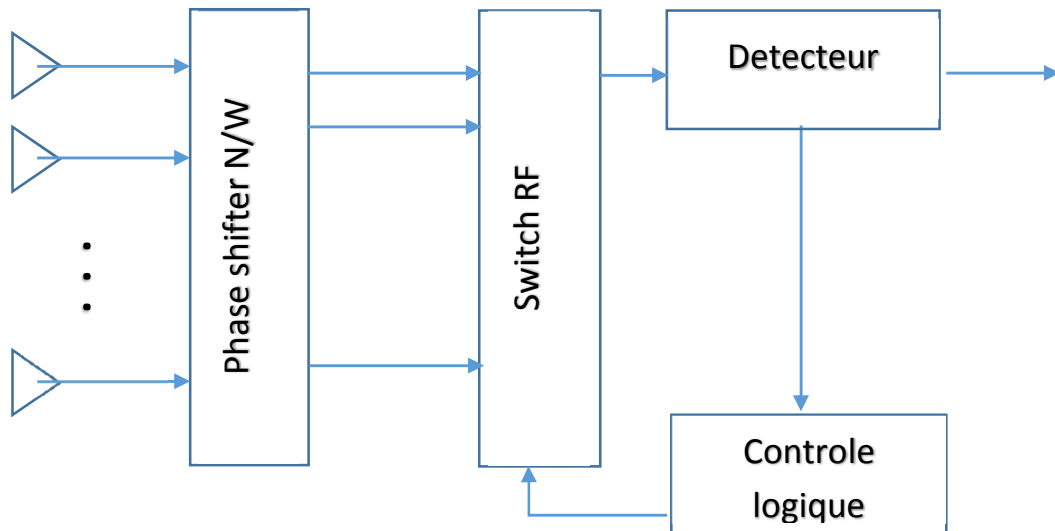
**Figure I.2 :** Formation de faisceau pour le système de faisceau commuté

#### I.3.3.1.1 Principe

Considérez un système de formation commuté représenté sur le schéma I.3. Il se compose d'un réseau de déphasage, qui permet de répartir la puissance d'alimentation sur les sources selon une loi d'amplitude et de phase servant à former les faisceaux multiples regardant dans certaines directions.

Il peut varier d'une configuration simple réalisant la commutation des sources à des configurations plus complexes permettant de reconfigurer les faisceaux.

Le commutateur RF enclenche le bon faisceau dans la direction désirée. Le choix du bon faisceau est fait par la commande logique. La commande logique est régie par un algorithme qui balaye tous les faisceaux et choisit celui recevant le signal le plus fort basé sur une mesure faite par le détecteur. Ainsi il évalue les amplitudes et les phases en fonction de la tâche désirée et commande le circuit de formation de faisceaux.



**Figure I.3 :** Schéma fonctionnel du système à commutation de faisceaux

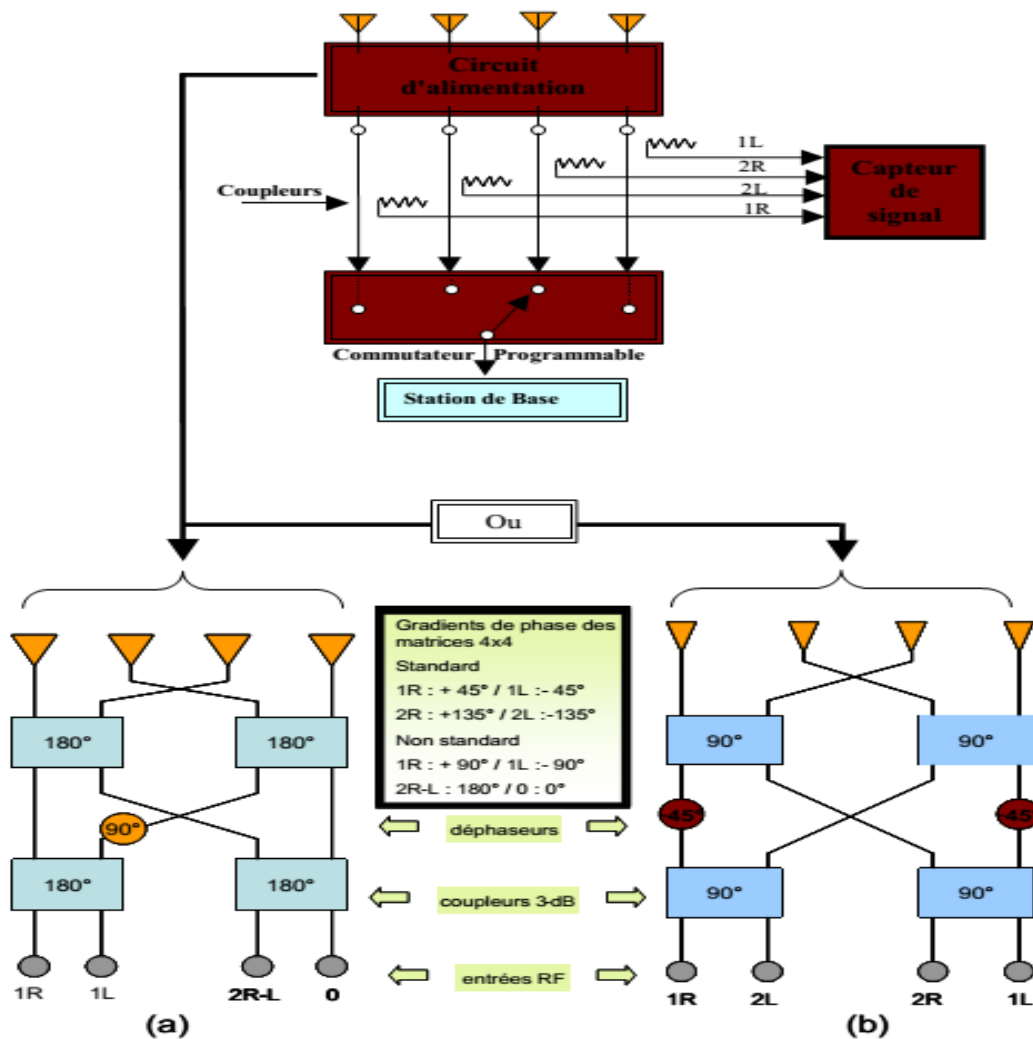
### I.3.3.1.2 Quelques techniques pour la fournissent des faisceaux fixes

#### I.3.3.1.2.1 Matrice De Butler

La théorie des matrices de Butler remonte aux années 1960. Ces matrices sont de plus en plus étudiées aujourd'hui pour la mise en œuvre des réseaux de formation de faisceaux pour les antennes multifaisceaux tant actives que passives.

La matrice de Butler [9] est sûrement un des répartiteurs de faisceaux les plus pratiqués. C'est un circuit passif à  $N$  ports d'entrées et  $N$  ports de sorties qui pilote  $N$  éléments rayonnants produisant  $N$  faisceaux orthogonaux différents.

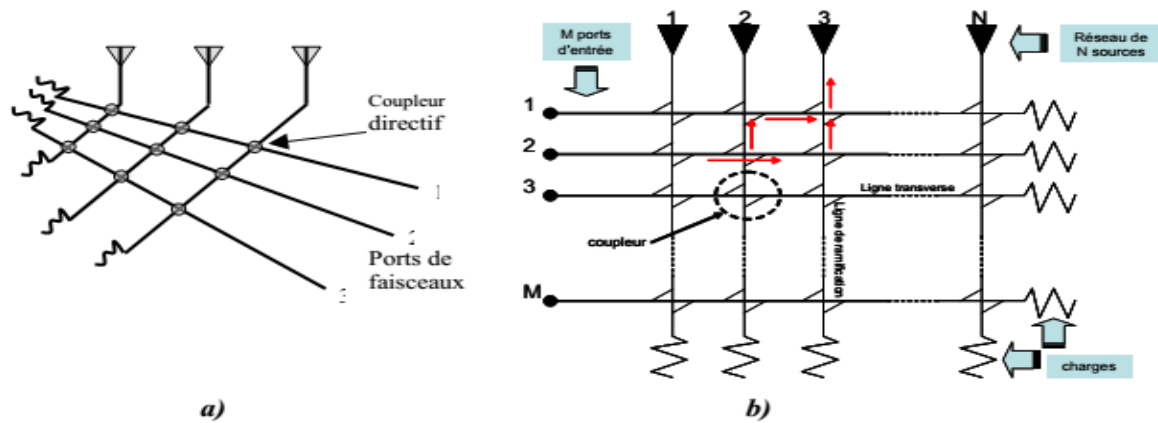
Le nombre de faisceaux d'une matrice de Butler est égal au nombre de ports d'entrée ( $N$ ). Les différents étages de division de puissance composés de coupleurs et de déphaseurs permettent ensuite d'obtenir les incréments de phase à imposer au réseau de  $N$  éléments pour aboutir au dépointages désirés. La figure I.4 montre le schéma de principe d'une matrice de Butler.



**Figure I.4 :** Schémas des matrices de Butler 4x4 : (a) matrice non standard, (b) matrice standard

#### I.3.3.1.2.2 Matrice De Blass

La matrice de Blass [11, 12], est une matrice qui peut générer des faisceaux multiples. Elle utilise un ensemble de lignes de transmissions reliées à un réseau d'antennes (N éléments) qui intersecté un ensemble des lignes des ports M de faisceaux, avec un coupleur directionnel à chaque intersection. La Figure I.5.a. montre un exemple pour un réseau 3 éléments, mais une matrice de Blass peut être conçue avec un nombre quelconque d'éléments Figure I.5.b.

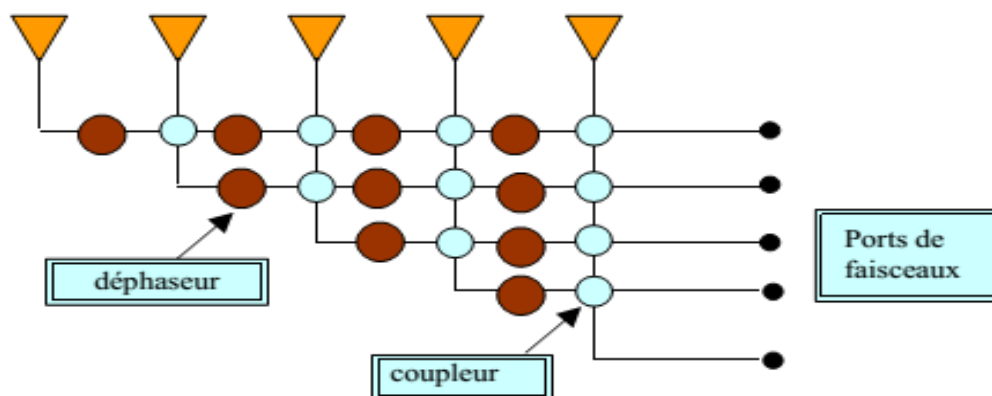


**Figure I.5 :** Schéma représentatif de matrice de Blass

Le port 2 fournit des retards égaux à tous les éléments, ayant pour résultat un faisceau dans le plan de rayonnement (broadside). Les deux autres ports fournissent des délais progressifs entre les éléments et produisent les faisceaux qui sont en dehors du plan de rayonnement (broadside). La matrice a été optimisée pour obtenir les faisceaux presque orthogonaux. Le nombre de coupleurs,  $C$  requis pour former  $M$  faisceaux est donné par :  $C = MN$

#### I.3.3.1.2.3 Matrice de Nolen

La matrice de Nolen peut être vue comme combinaison d'une matrice de Butler et d'une matrice de Blass, les  $N$  éléments d'une antenne sont couplés à  $M$  ports de faisceau comme représenté au, Figure I.6. Comme la matrice de Blass, la matrice de Nolen peut alimenter un nombre d'antennes différent du nombre d'orientations de faisceaux. La matrice de Nolen est composée de déphaseurs et de coupleurs. Elle est une représentation générale de la transformé discrète de Fourier. Comme la matrice de Blass, elle est rarement utilisée à cause de ses pièces coûteuses, et des difficultés de l'ajustement de réseau [13].



**Figure I.6 :** Schéma représentatif de matrice de Nolen

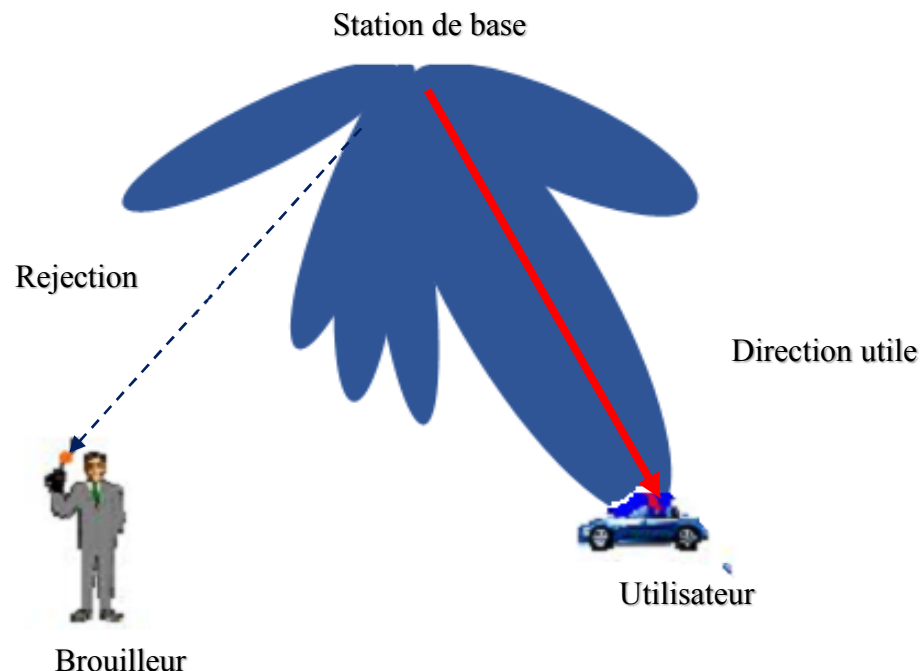
### I.3.3.2 Les systèmes d'antennes adaptatives

À la différence des systèmes de faisceau commutés, les systèmes adaptatifs sont vraiment intelligents parce qu'ils s'adaptent constamment à l'environnement radio au fur et à mesure de ses changements. Ils ont une multitude de modèles de rayonnement comparés aux modèles finis fixes dans les systèmes de faisceau commutés.

Les antennes adaptatives peuvent être définies comme des réseaux d'antennes avec traitement du signal qui peuvent modifier leurs diagramme de rayonnement de façon dynamique pour s'adapter au bruit, au brouillage et à la propagation par trajets multiples. Elles sont utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit+brouillage (SINR) à la réception et peuvent également être considérées comme des antennes à faisceaux modelés pour l'émission [10].

Elles sont aussi définies comme des systèmes qui peuvent associer des technologies d'antennes adaptatives et des technologies de faisceaux commutés.

Ces antennes focalisent son lobe principal dans la direction où une source est détectée, suit l'utilisateur mobile pendant qu'il se déplace, et réduit en même temps l'interférence résultant d'autres utilisateurs par la présentation nuls dans leurs directions. Ceci est illustré dans un diagramme simple représenté ci-dessous sur le schéma I.7



**Figure I.7 :** Formation de faisceau pour le système d'antennes adaptatives



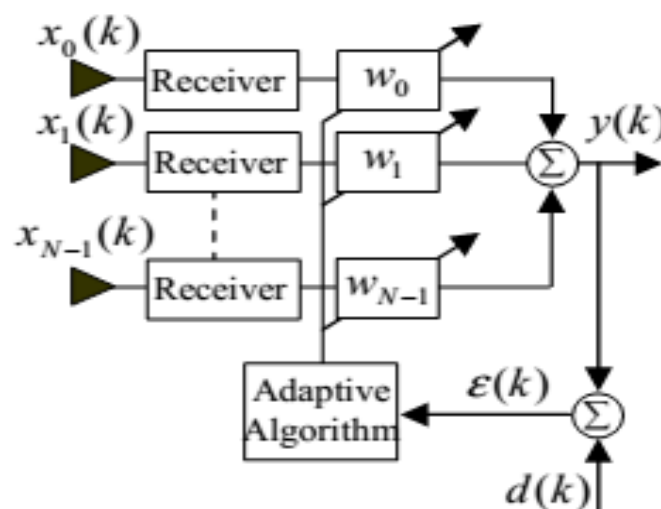
Les systèmes d'antennes adaptatives représentent le système le plus avancé des systèmes d'antennes intelligentes jusqu'ici, l'intelligence dans ces systèmes vient du processeur numérique intelligent cela est incorporé dans le système [14]. Le traitement est principalement régi par des algorithmes intensifs complexes.

### I.3.3.2.1 Principe

Un système d'antenne adaptative peut exécuter les fonctions suivantes: d'abord la direction de l'arrivée de tous les signaux entrants comprenant les signaux d'interférences et les signaux multi trajets sont estimés en utilisant des algorithmes de la direction d'arrivée(DoA). Ainsi, le signal désiré d'utilisateur est identifié et séparé du reste des signaux entrants non désirés et des autres signaux parasites. Finalement un faisceau est orienté sans interruption dans la direction du signal désiré tandis que le placement s'annule aux directions d'interférence de signal.

Comme discuté précédemment, il est tout à fait évident que la direction du rayonnement du faisceau principal dans une rangée dépend de la différence de phase entre les éléments de cette rangée. Le même concept forme la base dans les systèmes adaptatifs dans lesquels les signaux individuels sont multipliés par des nombres complexes appelés poids permettant d'ajuster aussi bien la phase que l'amplitude pour réaliser le rayonnement maximum dans la direction désirée. Ces poids complexes sont calculés par un algorithme adaptatif compliqué.

Pour avoir une meilleure compréhension de la façon dont les systèmes fonctionnent, nous considérons un réseau de formation de faisceau numérique adaptatif typique représenté ci-dessous sur le schéma I.8.



**Figure I.8 :** Schéma fonctionnel du système d'antennes adaptatives [18]

Avant que les signaux entrants soient pondérés ils sont rapportés à la bande de base ou aux fréquences intermédiaires. Les récepteurs fournis à la sortie de chaque élément exécutent la conversion nécessaire de fréquence. On l'exige que le signal soit converti en format numérique avant qu'ils soient traités par les processeurs de signal numérique (DSP). Les convertisseurs Analogique-numérique (ADC) sont fournis à ce but.

Le processeur de signal numérique forme le cœur du système, qui accepte le signal dans le format numérique et le traitement des données numériques est conduit par le logiciel. Le processeur interprète l'information entrante de données, détermine les poids complexes et multiplie les poids à chaque élément de sortie pour optimiser le modèle de rayonné. L'optimisation est basée sur un critère particulier [4], qui réduit au minimum la contribution du bruit et de l'interférence tout en produisant le gain maximum de faisceau à la direction désirée. Il existe plusieurs algorithmes basés sur différents critères pour mettre à jour et calculer les poids optimaux.

### I.3.3.2.2 Structure d'une antenne adaptative

La structure d'une antenne intelligente [15, 16] est illustrée par la Figure I.9. Elle est constituée d'un réseau de  $M$  antennes élémentaires dont les sorties sont pondérées par un terme complexe  $w$  avant d'être sommées entre elles. L'unité de contrôle des pondérations permet de mettre en forme un diagramme de rayonnement par l'ajustement "intelligent" de l'amplitude et (ou) de la phase avec laquelle se combinent les signaux reçus (ou émis) sur les différents éléments.

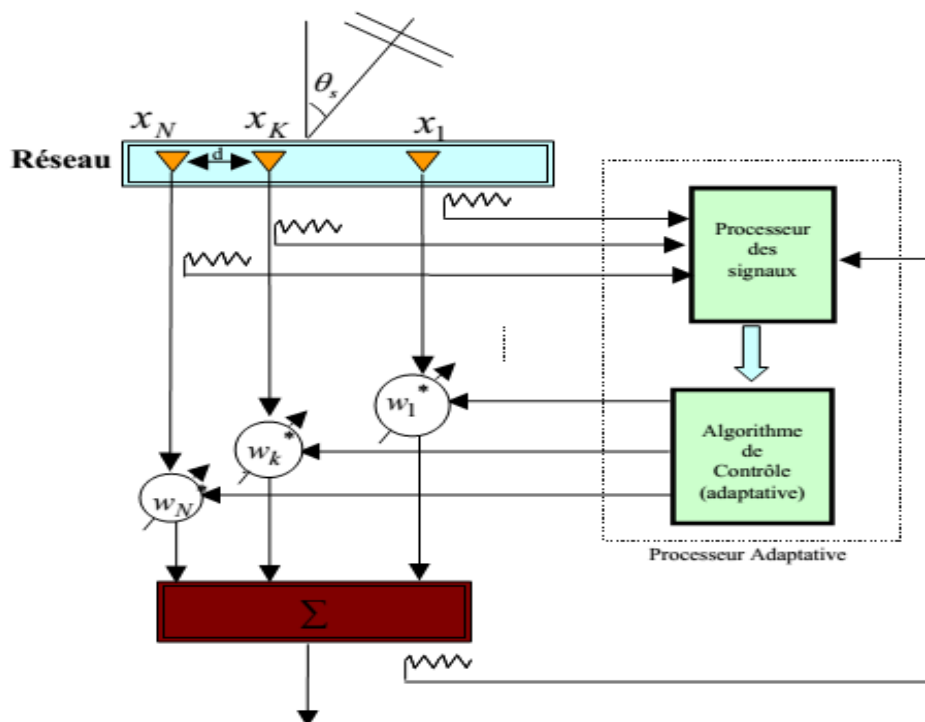


Figure I.9 : Schéma représentatif d'une antenne adaptative

La sortie du réseau s'écrit

$$y(t) = [W_1, W_2, \dots, W_N] \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ \vdots \\ X_N(t) \end{bmatrix} = W^H(t)X(t) \quad (I.1)$$

Où  $W_H(t)$  est la pondération du vecteur de poids et  $X_i(t)$  désigne le signal reçu par la  $i$ -ième antenne.

Si nous supposons que le premier élément de réseau est la référence de phase, le déphasage relatif du signal reçu au  $n$ ième élément est

$$\phi_n = [2\pi d(n-1) / \lambda] \sin \theta_s \quad (I.2)$$

Nous désignons par  $\theta_s$  la direction du signal incident et  $e$  le diagramme élémentaire. Alors le signal sur le  $n^{ième}$  élément est

$$x_n(t) = e \cdot \exp j(\omega t + \phi_n) \quad (I.3)$$

D'après les équations I.1, I.2 et I.3 nous obtenons

$$y(t) = \sum_{n=1}^N e \cdot W_n \cdot \exp j \left[ \omega t + \left( \frac{2\pi d(n-1)}{\lambda} \right) \sin \theta_s \right] \quad (I.4)$$

La structure de l'unité de contrôle dépend de l'information que l'on connaît a priori ou que l'on peut estimer au niveau de la station de base. Cette information inclut le type de modulation, le nombre de trajets séparables et leurs angles d'arrivée, la présence ou non d'une séquence d'apprentissage et la complexité de l'environnement de propagation.

### I.3.3.2.3 Intérêt des antennes adaptatives

L'intérêt de ce système est leur capacité à réagir automatiquement [17], en temps réel, à des modifications du canal de propagation. Grâce à sa capacité de poursuite précise et de rejet d'interférence, plusieurs utilisateurs peuvent se partager le même canal.

Une antenne adaptative évoque la possibilité de séparer des signaux (utile et interférence) et optimise le diagramme de rayonnement automatiquement en ajustant les pondérations appliquées jusqu'à ce que l'objectif prescrit soit atteint à l'aide d'un algorithme prédéfini.

### I.3.3.2.4 Les applications des antennes adaptatives

Initialement développées pour des applications en radar et sonar, les systèmes d'antennes adaptatives, ont fait leur apparition dans le domaine des radiocommunications grand public, Celles-ci peuvent s'appliquer à des réseaux locaux de proximités tels que le réseau de données sans fils Bluetooth grâce à l'évolution du marché, au développement des radiocommunications et aux avancées technologiques dans les domaines des hyperfréquences et de la microélectronique.

### I.3.3.3 Comparaison des systèmes de commutation de faisceaux et systèmes adaptatives

#### ❖ Système de faisceau commuté

- ✓ les déphasages exigés sont fournis par les réseaux fixes simples de déphasage.
- ✓ ils n'exigent pas des algorithmes complexes; des algorithmes simples sont employés pour le choix de faisceau.
- ✓ il exige seulement l'interaction modérée entre l'unité mobile et la station de base par rapport au système adaptatif.
- ✓ Puisque la basse technologie est employée, il a peu de coût et complexité.
- ✓ l'intégration dans le système cellulaire existant est facile et bon marché.
- ✓ il fournit l'augmentation significative de couverture et capacité comparés par des systèmes basés sur l'antenne conventionnelle.
- ✓ puisque des faisceaux étroits multiples sont employés, des handovers intracellulaires fréquents entre les faisceaux doivent être manipulés en tant que mouvements mobiles d'un faisceau à l'autre.

#### ❖ Système adaptatif

- ✓ il exige l'exécution de la technologie de DSP.
- ✓ il exige des algorithmes adaptatifs compliqués pour orienter le faisceau et les zéros.
- ✓ il a de meilleures possibilités de rejet d'interférence comparées aux systèmes commutés de faisceau
- ✓ il n'est pas facile de mettre en application dans le système existant, et cher.
- ✓ puisque le faisceau suit sans interruption l'utilisateur; handover intracellulaires sont moins.
- ✓ il fournit une meilleure couverture et une capacité accrue en raison du rejet d'interférence amélioré par rapport au système commuté de faisceau.
- ✓ il peut rejeter les composants multi trajets ou les ajouter en corrigeant les retards pour augmenter la qualité de signal.
- ✓ Les antennes adaptatives offrent un avantage certain en termes de fonctionnalités (multi service et transfert de données) par rapport aux antennes non adaptatives.
- ✓ le coût matériel (plus d'antennes, réseaux de pondération, processeurs de calcul...); et la complexité hardware et software.

**I.4.conclusion**

Ce premier chapitre décrit brièvement les principaux concepts. Dans un premier temps, une introduction du concept des antennes intelligentes : structure, types et avantages et une mise au point sur les différentes méthodes actuelles de traitement d'antennes intelligentes, nous avons adopté la technique de formation de lobes (des faisceaux) et l'annulation d'interférents.

L'application du concept d'antennes intelligentes à un réseau de communication permet d'optimiser le diagramme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace. L'annulation de certaines directions permet d'éliminer des émissions parasites qui perturberaient les autres communications ou diminueraient le débit de transmission de données. Enfin, le fait d'être capable de ne rayonner que dans certaines directions évite d'interagir avec d'autres systèmes ou d'endommager certains équipements et préserve l'environnement.