

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M/GE/2020

MEMOIRE DE PROJET DE FIN CYCLE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

**Systèmes d'antennes intelligentes de la 5^{ème} génération de
téléphonie mobile**

Thème

Présenté par :

- Melle. MESSABIHI Mimouna
- Mlle. SAHRAOUI Bahria

Soutenue le 2020 devant le Jury composé de :

Président
Examineur
Encadreur

OULDMAMAR
A. OULDALI
B. AHMADOUCHE

MCA – Mostaganem
MCA – Mostaganem
MCA – Mostaganem

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019 /2020



REMERCIEMENTS

Nous profitons de cette occasion pour remercier :

*Avant tout, **ALLAH**, le tout puissant, de nous avoir donné le
Courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche*

*Tous ceux qui de près ou de loin ont participés à notre
Éducation.*

Nos parents, nos frères et sœurs pour leur soutien indéfectible.

*L'ensemble du personnel Enseignant et Administratif de l'université de
Abdelhamid ibn badis*

*Un remerciement et une reconnaissance particulière à notre encadreur Mr
Ahmadouch pour ses conseils Avérés, ses efforts et son écoute particulière.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour leur disponibilité, pour
Leur lecture attentive de notre thèse ainsi que pour les remarques qu'ils nous
Adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail.*

Merci à tous



Dédicace

A nos parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler « vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation nous sommes fières ». Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la formation de faisceau dans les systèmes d'antennes intelligentes utilisés dans les réseaux de communication sans fil de cinquième génération. Après un aperçu sur l'état de l'art de la téléphonie mobile et ses avancés jusqu'à la technologie de cinquième génération, les problèmes liés à la propagation multi trajets des ondes électromagnétiques dans un environnement réel sont montrés et les solutions apportées grâce à la diversité et la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) sont exposées. Ensuite, la technique des systèmes massive MIMO (MIMO à grande échelle) utilisant un grand nombre d'antennes intelligentes, appliquée dans la technologie 5G est présentée. La formation de faisceau est traitée en détail. Nous présentons d'abord les techniques fixes : faisceau obtenu par un alignement de sources équidistantes, d'égales amplitudes et de phase progressive et la synthèse par la méthode de Dolph Tchebychev pour régler le niveau des lobes secondaires. Ensuite la formation de faisceau utilisée dans les systèmes d'antennes intelligentes est abordée. L'approche la plus intéressante dans ce domaine, purement numérique, est l'antenne adaptative. Les algorithmes utilisés pour la mise à jour des poids des éléments du réseau s'adaptent en temps réel. Nous avons utilisé pour optimiser le faisceau, le critère qui permet de maximiser le rapport signal à interférence SIR. L'autre approche étudiée est à la base des systèmes à commutation de faisceau ; elle est analogique et utilise la matrice de Butler. A chaque fois des codes Matlab sont écrits et exécutés pour montrer la formation de faisceaux par les techniques décrites.

Mots clés : Téléphonie mobile, 5G, Antennes réseaux, Antennes intelligentes, Antennes adaptatives, Antennes à faisceau commuté, Formation de faisceau, Matrice de Butler.

Abstract:

The work presented in this dissertation concerns beamforming in smart antenna systems used in fifth generation wireless communication networks. After an overview on the state of the art of mobile telephony and its advances up to the fifth generation technology, the problems linked to the multipath propagation of electromagnetic waves in a real environment are shown and the solutions provided thanks to diversity and MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology are on display. Next, the technique of massive MIMO (large-scale MIMO) systems using a large number of smart antennas, applied in 5G technology is presented. Beamforming is discussed in detail. We first present the fixed techniques: beam obtained by an alignment of equidistant, equal amplitude and progressive phase sources and the synthesis by the method of Dolph Chebyshev to adjust the level of the sidelobes. Then the beamforming used in smart antenna systems is discussed. The most interesting approach in this area, purely digital, is the adaptive antenna. The algorithms used for updating the weights of network elements adapt in real time. We used to optimize the beam, the criterion that maximizes the signal to interference ratio SIR. The other approach studied is the basis of beam-switching systems; it is analog and uses the Butler matrix. Each time Matlab codes are written and executed to show the formation of beams by the techniques described.

Keywords: Mobile telephony, 5G, Network antennas, Smart antennas, Adaptive antennas, Switched beam antennas, Beam forming, Butler matrix.

ملخص:

يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة بتشكيل الحزم في أنظمة الهوائيات الذكية المستخدمة في شبكات الاتصالات اللاسلكية من الجيل الخامس. بعد نظرة عامة على أحدث ما توصلت إليه تقنية الهاتف المحمول وتطوراتها حتى تكنولوجيا الجيل الخامس، يتم عرض المشكلات المتعلقة بالانتشار متعدد المسارات للموجات الكهرومغناطيسية في قناة حقيقية والحلول المقدمة بفضل التنوع وMIMO (متعدد- يتم عرض تقنية الإدخال والإخراج المتعدد. بعد ذلك، يتم تقديم تقنية أنظمة MIMO الضخمة (MIMO واسعة النطاق) التي تستخدم عددًا كبيرًا من الهوائيات الذكية المطبقة في تقنية G5. تمت مناقشة Beamforming بالتفصيل. نقدم أولاً التقنيات الثابتة: الشعاع الذي تم الحصول عليه من خلال محاذاة مسافات متساوية ومتساوية السعة ومصادر الطور التدريجي والتوليف بواسطة طريقة Dolph Chebyshev لضبط مستوى الفصوص الجانبية. ثم تتم مناقشة تشكيل الحزمة المستخدمة في أنظمة الهوائيات الذكية. الطريقة الأكثر إثارة للاهتمام في هذا المجال، الرقمية البحتة، هي الهوائي التكيفي. تتكيف الخوارزميات المستخدمة لتحديث أوزان عناصر الشبكة في الوقت الفعلي. اعتدنا على تحسين الحزمة، المعيار الذي يزيد من نسبة الإشارة إلى التداخل SIR. النهج الآخر المدروس هو أساس أنظمة تبديل الحزمة؛ إنه تمثيلي ويستخدم مصفوفة بتلر. في كل مرة يتم كتابة وتنفيذ أكواد ماتلاب لإظهار تشكيل الحزم بالتقنيات الموضحة.

الكلمات المفتاحية: الهواتف المحمولة، G5، الهوائيات الشبكية، الهوائيات الذكية، الهوائيات التكيفية، الهوائيات ذات الشعاع المحول، تشكيل الشعاع، مصفوفة بتلر.

Sommaire

- Remerciements
- Dédicaces
- Liste des chapitres
- Liste des Figures
- Liste de Tableaux
- Liste des abréviations,
singles et acronymes.

Liste des chapitres :

Titre	Page
Introduction générale	1
Chapitre 1 : les réseaux téléphonies mobiles	
I-1 définition	3
I -2 évolution des générations mobiles.....	3
I-2-1 La première génération(1G)	4
I-2-2 La deuxième génération(2G)	4
I-2-3 troisième génération 3G	5
I -2-4 Quatrième génération(4G)	5
I-3 La 5em Génération(5G)	7
I-3-1 introduction	7
I-3-2 comparaison entre 5G et 4G.....	8
I-3-3 Applications visées pour le réseau de 5G	9
I-3-4 Les fréquences utilisées dans la 5G.....	9
I -3-4-1 le FR1 ou bien sub 6	10
I-3-4-2 La bande millimétrique	11
I-3-5 Les avantages de la 5G.....	11
I-4 Technologies Émergentes Pour réseaux 5G	12
I-4-1 Beamforming	12
I -4-2 Millimeter Waves.....	13
I-4-3 Massive MIMO.....	13
I -4-4 Multiplexage NOMA.....	14
I-4-5 Un duplex plein (Full duplex)	15
I-4-6 La technologie NR.....	15
I-4-7 Internet des objets (IoT).....	16
I-4-8 Communication Device-to-Device (D2D)	16
I -4-9 Prise en charge native de la communication machine-to-machine (M2M)	16
I-4-10 S software Defined Network (SDN)	16
I-4-11 Network Fonction Virtualisation (NFV)	17
I-4-12 cloud RAN (C-RAN)	17
Conclusion	17
Chapitre II : les caractéristiques du canal de propagation	
II-1 Introduction	18
II -2 canal de propagation	18
II-3 les principaux phénomènes de propagation	19
II -4 propagation en espace libre.....	20
II-5 propagation multi trajets	21
II-6 Modélisation du canal de propagation	23
II-6-1 la réponse impulsionnelle de canal	24
II-7 Les Variations du canal de propagation	25
II-7-1 L'évanouissement (fading)	26
II-7-2 Multipath fading basics.....	26
II -8 La diversité	26
II -8-1 Technique de diversité.....	27
II -9 Les systèmes MIMO (multiple input, multiple output)	29
II -9-1 Principe de la technique MIMO	30

Conclusion.....	31
Chapitre III: les méthodes de réseau 5G	
III-1 Introduction	32
III-2 Les antennes réseaux	32
III-3 réseau d'antennes à éléments multiples.....	34
III-3-1 Les antennes mimo	34
III-3-2 Description générale du MIMO au Massive MIMO.....	35
III-3-3 Le beamforming et les antennes massive mimo.....	36
III-4 Les antennes intelligentes.....	37
III-4-1 système à réseau d'antenne à commutation de faisceau.....	37
III-4-2 système à réseau adaptatif	38
Conclusion	40
Chapitre IV : synthèse de faisceau beamforming	
IV-1 introduction	41
IV-2 Synthèse des réseaux directifs.....	41
IV-2-1 Alignement de sources équidistantes avec phase progressive	41
IV-2-1-1 Notions générales	41
IV-2-1-2 alignement selon Oz de Nz sources isotropes.....	43
IV-2-1-3 alignement selon Oy de Ny sources isotropes.....	47
IV-2-1-4 Réseau 2D dans le plan 0y0z de Ny*Nz sources isotropes....	49
IV-2-2 Synthèse de faisceau par la méthode de Dolph Tchebychev	52
IV-3 Synthèse de lobe pour les antennes intelligentes	56
IV-3-1 modèle du signal et terminologie.....	56
IV-3-2 Estimation des directions d'arrivée.....	58
IV -3-3 Beamforming numérique	59
IV -3-4 Beamforming analogique	64
Conclusion générale	70

Liste des figures :

Figure	page
Chapitre I :	
FigureI -1 évolution des génération mobiles figure I-2 les bandes de fréquences	3
FigureI -2 les bandes des fréquences	6
Figure I-3 les graphiques illustre l'évolution mondial de ces génération de réseau mobile	7
Figure I-4 l'évolution de la téléphonie mobile	8
Figure I-5 la comparaison entre 4G et 5G	9
Figure I -6 : les deux gammes de fréquences de la 5G (fr1, fr2).....	10
Figure I -7 : Les fréquences utilisées dans la 5G	11
Figure I-8 les avantages de la 5G	11
Figure I-9 technologies émergentes pour réseaux 5G	12
Figure I-10 : Découpage en tranches du réseau 5G.....	12
Figure I-11 technologie beamforming	13
Figure I-12 massive mimo	14
Figure I-13 multiplexage NOMA	15
Figure I-14 duplex plein	15
Figure I-15 conception de of Object dans system 5G	16
Chapitre II :	
Figure II-1 schéma synoptique d'une chaine de communication	18
Figure II-2 : la réflexion	19
Figure II-3 : la diffraction	19
Figure II-4 : la dispersion	20
Figure II-5 : la réfraction	20
Figure II-6 propagation par multi-trajet dans un environnement	22
Figure II-7 propagation multi-trajet NLOS	23
Figure II-8 propagation multi-trajet LOS	23
Figure II-9 représentation en bande de basse du canal de propagation	24
Figure II-10 : Représentation de la réponse impulsionnelle d'un canal radio mobile.....	24
Figure II-11 les variations du canal de propagation	25
Figure II-12 schéma de la principale de la diversité	27
Figure II-13diversité fréquentielle	27
Figure II-14 diversité de polarisation	28
Figure II-15 : diversité de diagramme	29
Figure II-16 système mimo	29
Figure II-17 principe de mimo	30

Chapitre III :	
Figure III-1 : Réseau de N sources élémentaires.....	33
Figure III-2 : Configuration MIMO. Matrice de transmission	34
Figure III-3 : modèle mimo massif - M antennes - K utilisateur s.....	35
Figure III-4 : les principaux avantages de mimo massif	36
Figure III-5 : beamforming et formation faisceau	36
Figure III-6 : Environnement multi-trajets entre le réseau d'antennes et l'utilisateur	37
Figure III-7: Antenne réseau à commutation de faisceau	38
Figure III-8: Structure et principe du système adaptatif	39
Chapitre IV :	
Figure IV-1 Réseau linéaire de sources équidistantes avec phase progressive...	42
Figure IV-2: Réseau linéaire selon $0z$	44
Figure IV-3 : Diagramme en champ en dB	45
Figure IV-4: Représentation du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires.....	45
Figure IV-5 :Représentation du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires 16 antennes	46
Figure IV-6: Diagramme en champ en dB 16 antennes	46
Figure IV-7: Réseau linéaire $0y$	47
Figure IV-8 : Diagramme en champ du réseau linéaire selon $0y$	48
Figure IV-9 : Diagramme en champ en coordonnées polaires du réseau linéaire selon $0y$	48
Figure IV-10: Diagramme en champ en coordonnées polaires du réseau linéaire selon $0y$	49
Figure IV-11 : Le Réseau 2D bilinéaire étudié.....	50
Figure IV-12 : Répartition de puissance normalisée au sol autour de l'antenne réseau	52
Figure IV-13 : Réseau de N sources identiques équidistantes, alimentée avec des courants d'amplitudes A_i différentes et de phase φ progressive	53
Figure IV-14 : Représentation du polynôme de Tchebychev de degré (N-1) rendant optimale la répartition d'amplitude et le diagramme du champ de N sources.....	54
Figure IV-15 : Diagramme en champ en dB. Répartition équi-amplitudes	55
Figure IV-16 : Diagramme en champ en coordonnées polaires.....	55
Figure IV-17 : Schéma simplifié d'une antenne intelligente	56
Figure IV-18 : signal incident sur réseau d'antenne	57
Figure IV-19: Diagramme synthétisé avec un réseau de 4 antennes.....	61
Figure IV-20: Diagramme synthétisé avec un réseau de 4 antennes Représentation polaire.....	62
Figure IV-21 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 8 antennes.....	63
Figure IV-22 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 8 antennes Représentation polaire.....	63
Figure IV-23 : Matrice Butler 4x4.....	64

Figure IV-24 : Coupleur hybride 90° (-3dB).....	65
Figure IV-25 : Les 4 lobes orthogonaux du réseau d'antennes à 4 éléments isotropes.....	66
Figure IV-26: Matrice Butler 8x8.....	67
Figure IV-27 : Les 8 lobes orthogonaux du réseau d'antennes à 8 éléments isotropes.....	69

Liste des tableaux :

Tableau	Page
Tableau I -1 : débits des réseaux 3g	5
Tableau I -2 : vitesses permises par les différentes générations de réseaux ..	8
Tableau IV-1 : Déphasages produits en sortie de la matrice 4x4 pour des signaux appliqués aux différentes entrées. Les déphasages progressifs nécessaires sont mentionnés.....	65
Tableau IV-2 : Déphasages produits en sortie de la matrice 8x8.....	68

Liste des abréviations, singles et acronymes :

GPS Global Positioning System
LTE Long Term Evolution
AMPS Advanced Mobile Phone System
FDMA Frequency Division Multiple Access
NMT Nordic Mobile Téléphonie
TACS Total Access Communications System
GSM Global System for Mobile
CDMA Code Division Multiple Access
TDMA Time Division Multiple Access
GPRS General Packet Radio Service
EDGE Enhanced Data GSM Environmen
MBB Mobile Broad Band
MTC Machine Time Communication
URLLC ultra Reliable Low latency Communication
UDN Ultra Dense Network
MIMO Multiple Input Multiple Output
SISO Single Input Single Output
NOMA Non Orthogonal Multiple Access
SCMA sparse code multiple accès
CDMA code division multiple acces
NR New Radio
D2D Device-to-Device
M2M communication machine-to-machine
SDN Software Defined Network
NFV Network Fonction Virtualisation
C-RAN Cloud RAN
NLOS None Line Of Sight
LOS Line Of Sight
SDMA Space Division Multiple Access
STC space time coding
DOA Direction Of Arrivai
FPGA field programmable gâte array
ADC analog to digital converter
RF radio frequency

Références biographiques.

Les annexe

Introduction générale

Introduction Générale :

Au cours des dernières décennies, les communications mobiles ont contribué de manière significative au développement économique et social des pays développés. Actuellement, ils représentent une partie indispensable de la vie quotidienne pour des millions de personnes dans le monde, une situation qui devrait continuer à augmenter jusqu'à devenir plus inévitable au futur.

Les nombreux opérateurs à travers le monde mettent en œuvre le LTE (Long Term Evolution) pour fournir un accès à des temps d'accès plus courts et une plus grande efficacité que les avancées 3G et 3.5G. Ils sont également dans le développement et la mise en œuvre du LTE-A qui est une évolution 4G. Par conséquent, on s'attend à ce qu'il y ait des défis importants pour le nouveau système de communication mobile qui commence à émerger, c'est-à-dire la génération V (5G).

La principale caractéristique des réseaux 5G est leur conception pour que l'utilisateur puisse se connecter simultanément à plusieurs technologies sans fil et échanger entre eux. La 5G se concentre sur les appareils qui prennent en charge la voix sur IP (VoIP), où l'utilisateur verra un taux élevé de transmission de données (débit de données d'envoi) et un volume approprié de l'appel. Cette technologie vise à répondre à toutes les exigences des clients qui aspirent à des fonctionnalités avancées dans les téléphones mobiles.

Récemment, une partie du spectre électromagnétique connu sous le nom bande millimétrique a été suggéré pour une utilisation dans la 5G. Plusieurs GHz de cette partie du spectre peuvent être utilisés pour fournir des commandes élevées de la taille des données pour les utilisateurs de téléphones mobiles ; ils peuvent également prendre en charge les connexions entre les petites cellules dans ces fréquences. Un large spectre est disponible qui n'est pas utilisé actuellement. Les fréquences 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz sont les plus confortables dans ce segment du spectre, selon des mesures récentes. En raison des faibles longueurs d'onde de ces ondes millimétriques, des antennes de grande capacités peuvent être fabriquées dans les petits appareils portables comme dans les stations de base.

Les environnements dans lesquels se propagent les ondes électromagnétiques constituent l'une des caractéristiques majeures des communications sans fil. Ils sont le plus souvent de type multi-trajets à cause des phénomènes de réflexion et de diffraction provoqués par les objets les constituant. Ceci peut entraîner un phénomène d'évanouissement des signaux reçus et altérer ainsi la qualité des communications. Plusieurs techniques ont été adoptées afin de lutter contre ce phénomène, parmi lesquelles celle de la diversité d'antennes, où plusieurs antennes sont placées à l'émission et à la réception (systèmes MIMO, Multi Input Multi Output).

La technologie multi input multi output (MIMO) est l'origine de la technologie des communications sans fils divers. Ainsi, la technologie des systèmes d'antennes intelligentes de dernières générations.

La technologie 5G utilise la technique des systèmes massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ou MIMO à grande échelle, en utilisant un grand nombre d'antennes intelligentes.

Cette technique de diversité spatiale multiple consiste à équiper une station de base avec un nombre élevé M d'antennes (réseaux) pour servir un nombre d'utilisateurs K avec $M > K$. Les K utilisateurs peuvent avoir plusieurs antennes dans leurs terminaux.

Contrairement aux systèmes traditionnels, les systèmes équipés d'une antenne intelligente déterminent la position des utilisateurs et des signaux parasites dans le but de concentrer la puissance uniquement dans la direction des utilisateurs.

La technique du beamforming utilisée dans ces systèmes consiste à focaliser un signal sans fil

vers un dispositif de réception spécifique, au lieu de le diffuser dans toutes les directions à partir d'une antenne radio, comme c'est habituellement le cas. La connexion, plus directe, est plus rapide et plus fiable qu'elle ne le serait sans formation de faisceau. Il existe deux façons pour réaliser cette formation de faisceau : le beamforming numérique et le beamforming analogique. Le "beamformer" numérique est constitué par un réseau d'antennes où chaque élément est directement relié à un convertisseur analogique numérique. En réception, un poids complexe affecté à chaque antenne est appliqué en numérique par l'unité de bande de base. Les algorithmes du "beamformer" adaptent le patron de rayonnement en optimisant ces poids. Le "beamformer" analogique par contre utilise des déphaseurs analogiques pour générer le déphasage nécessaire entre les éléments d'antenne afin d'adapter le patron de rayonnement. Les signaux déphasés sont combinés en une seule sortie analogique qui est convertie par un seul convertisseur analogique numérique. Une façon de réaliser ce "beamformer" est la matrice de Butler qui permet la conception de l'antenne à faisceau commutable qui a un nombre prédéfini de faisceaux.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la formation de faisceau dans les systèmes d'antennes intelligentes utilisés dans les réseaux de communication sans fil de cinquième génération. Il est organisé comme suit : Une introduction générale, trois chapitres, une conclusion générale et les références bibliographiques.

Le chapitre I présente l'état de l'art de la téléphonie mobile et ses avancées jusqu'à la technologie de cinquième génération.

Le chapitre II traite le canal de propagation. Nous montrons que les trajets multiples effectués par l'onde électromagnétique qui le traverse peuvent entraîner un phénomène d'évanouissement des signaux reçus et altérer ainsi la qualité des communications. Les solutions obtenues par la diversité et notamment les systèmes MIMO y sont présentées.

Dans le chapitre III, nous présentons les techniques utilisées dans les systèmes multi-antennes de dernière génération ; les systèmes MIMO multi-utilisateurs, les massive MIMO et les antennes intelligentes.

Le chapitre IV concerne la formation de faisceau. Nous y présentons d'abord les techniques fixes : faisceau obtenu par un alignement de sources équidistantes, d'égales amplitudes et de phase progressive, synthèse par la méthode de Dolph Tchebychev pour régler le niveau des lobes secondaires, Distribution de puissance créée autour d'un réseau bilinéaire 2D. Ensuite la formation de faisceau par les deux techniques numérique et analogique utilisées dans les systèmes d'antennes intelligentes est absorbée. A chaque fois des codes Matlab sont écrits et exécutés pour montrer la formation de faisceaux par les techniques décrites.

Une conclusion générale termine ce mémoire.

*Chapitre I : les réseaux de
Téléphonie mobile*

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord parler brièvement du concept cellulaire et de l'évolution des générations de téléphonie mobiles. Il y a beaucoup de questions et de discussions sur la définition des caractéristiques clés de la 5G, donc dans ce chapitre nous allons fournir un large aperçu sur les récentes informations concernant la 5^{ème} génération.

I-1) Définition :

Par définition, un réseau mobile est un système de réseau téléphonique qui fonctionne grâce à des fréquences formant un spectre hertzien. Ce réseau permet à des millions d'utilisateurs de téléphoner en même temps tout en étant en mouvement, sans aucune contrainte d'immobilité. Le premier réseau mis en service était déjà basé sur le concept de motif cellulaire, concept défini au sein des laboratoires « Bell Labs » au début des années 1970. Cette technique est une composante technologique clé des réseaux mobiles car elle permet de réutiliser les ressources du réseau d'accès radio sur plusieurs zones géographiques données appelées cellules. À une cellule est ainsi associée une ressource radio (une fréquence, un code...) qui ne pourra être réutilisée que par une cellule située suffisamment loin afin d'éviter tout conflit intercellulaire dans l'utilisation de la ressource. Conceptuellement, si une cellule permet d'écouler un certain nombre d'appels simultanés, le nombre total d'appels pouvant être supportés par le réseau peut être contrôlé en dimensionnant les cellules selon des tailles plus ou moins importantes. Ainsi, la taille d'une cellule située en zone urbaine est

Habituellement inférieure à celle d'une cellule située en zone rurale. Les réseaux mobiles sont tous basés sur ce concept de cellule, c'est pourquoi ils sont aussi appelés réseaux cellulaires

I-2) évolution des générations mobiles :

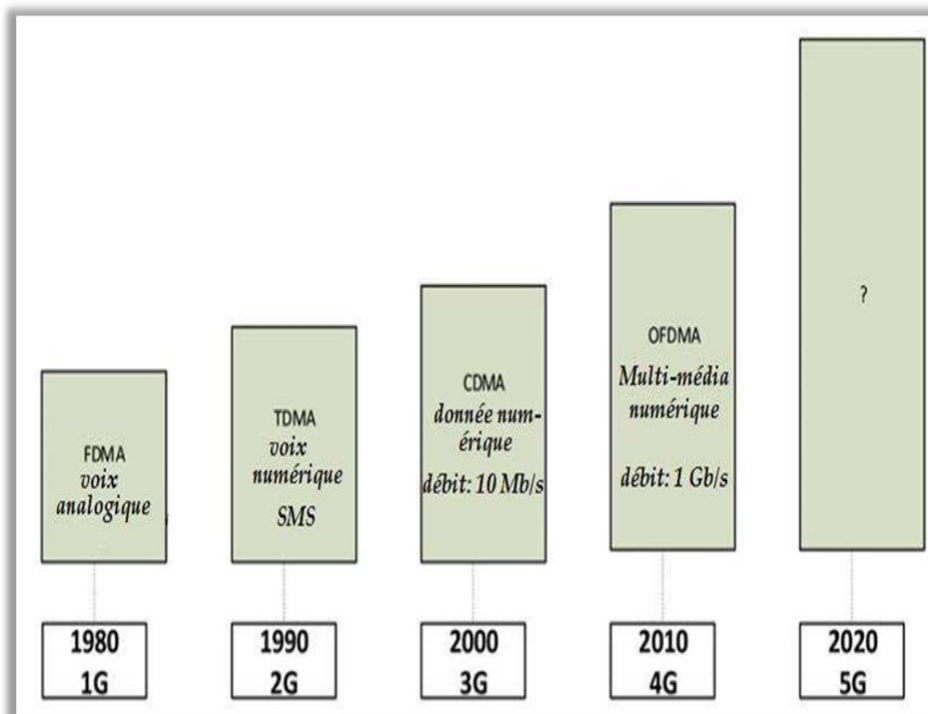


Figure I-1 : évolution des générations mobiles

I-2-1) La première génération (1G) :

La première génération de système cellulaire (**1G**) reposait sur un système de communications mobiles analogiques. Cette génération a bénéficié de deux inventions techniques majeures des années 1970 : le microprocesseur et le transport numérique des données entre les téléphones mobiles et la station de base. Les appareils utilisés étaient particulièrement volumineux [1]

La première génération de systèmes cellulaires (1G) utilisait essentiellement les standards suivants :

AMPS (Advanced Mobile Phone System), lancé aux Etats-Unis, est un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (Frequency Division Multiple Access).

NMT (Nordic Mobile Téléphonie) a été essentiellement conçu dans les pays nordiques et utilisés dans d'autres parties de la planète.

TACS (Total Access Communications System), qui repose sur la technologie AMPS, a été fortement utilisé en Grande Bretagne.

1G fait référence à la première génération de technologie sans fils cellulaire (téléphonie mobile). Ce sont des normes de télécommunications analogique qui ont été introduites dans les années 1980 et qui ont été déployées jusqu'à ce qu'elles soient remplacées par les télécommunication numérique 2G. la différence entre les deux technologies c'est le type de leur signal, la première est basée sur un réseau analogique et l'autre sur un réseau numérique.

Dans Les années 80 :

La 1ère génération des téléphones mobiles a débuté dans le début des années 80 en offrant un service médiocre de communication mobile, médiocre mais très coûteux. La 1G avait beaucoup de défauts : Des normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (on pouvait écouter les appels), pas de roaming vers l'international (roaming est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau autre que celui de son opérateur).

Les limites de la technologie 1G sont :

- une très mauvaise qualité de son
- une couverture limitée
- faible sécurité pas de support de cryptage

La 1G présente toutefois de nombreux défauts : service de communication mobile médiocre, non sécuritaire (appels non cryptés) et coûteux.

Le réseau 1G a commencé à céder la place à la 2G dans de nombreux pays vers la fin des années 80. Il est désormais obsolète.

Dotée d'un débit de transmission de 9,6 kbps maximum (GSM), la 2G permet de :

I-2-2) La deuxième génération (2G) :

La deuxième génération (2G) de systèmes cellulaires repose sur une technologie numérique a été développée à la fin des années 1980. Ces systèmes cellulaires utilisent une technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal [1]. Ce système apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur.

La deuxième génération de systèmes cellulaires (2G) utilise essentiellement les standards suivants :

1-GSM (2G) (Global System for Mobile) :

Est une technologie de téléphonie mobile numérique 2G Permettant l'envoi des SMS et MMS et l'échange de voix, le débit maximum du GSM est alors de 9,6 Kbps avec un débit moyen équivalent [2].

***CDMA (Code Division Multiple Access)** : est une technologie 2G développée par Qualcomm qui passe à la 3G

***TDMA (Time Division Multiple Access) :** Faible consommation de batterie, mais la transmission est unidirectionnelle et sa vitesse est pâle à côté des technologies 3G.

2- **GPRS**(General Packet Radio Service) : 2,5G est un système mobile intermédiaire entre la 2G et la 3G (débits inférieurs à 100 kbit/s). Il est possible, avec celui-ci, d'échanger des données (SMS, data, appels...) avec un débit théorique maximal de 171,2 Kb/s par seconde.

3- **EDGE**(Enhanced Data GSM Environmen) :2,75G, Peut être une solution temporaire pour les opérateurs incapables d'obtenir des licences W-CDMA. Le débit peut ici atteindre les 384 Kb/s par seconde. Cette norme est évoquée comme une "pré-3G".

La principale différence entre la 1G et la 2G réside sur le type de leurs signaux la première est basée sur un signal analogique tandis que la deuxième se base sur un signal numérique.

I-2-3) La troisième génération 3G :

La troisième génération (3G) de systèmes cellulaires est une génération de systèmes mobiles labellisé IMT 2000 par l'UIT. Ce système permet des services de communications plus rapides notamment pour la voix, la télécopie, l'Internet de n'importe quel endroit et à tout moment [1]. L'UIT IMT-2000 est la norme internationale de la 3G a ouvert la voie à de nouvelles applications et services comme par exemple le divertissement multimédia.

Réseau 3G+, H+ et H+ Dual Carrier :

La 3G a connu trois améliorations successives avec la 3G+ (aussi appelée HSPA), le H+ (HSPA+) et le H+ Dual Carrier (DC-HSPA+). Il s'agit d'évolutions de l'UMTS visant à bénéficier de meilleurs débits :

<i>Débits (Mbits/s)</i>	<i>réseau</i>
<i>3.6</i>	<i>3G+</i>
<i>5</i>	<i>H+</i>
<i>10</i>	<i>H++</i>

Tableau I -1 : débits des réseaux 3G

. Ces avancées ont permis d'aller plus loin dans les usages internet, avec notamment la possibilité de visionner des vidéos instantanément, sans patienter le temps du chargement[3].

I-2-4) La quatrième génération (4G) :

La 4G c'est la quatrième génération de réseaux mobiles. Elle succède à la 3G apparue il y a une dizaine d'années. Chaque génération améliorant les performances, la 4G permet de surfer jusqu'à 10 fois plus vite qu'en 3G avec des débits théoriques de 150 Mbit/s[1].

La 4G est basée sur la norme LTE (Long Term Evolution) dont le débit théorique atteint les 150 Mbit/s

Quelles fréquences ? Depuis l'avènement de la 4G LTE, choisir un téléphone n'est plus aussi anodin. Pour bénéficier d'une connexion optimale, c'est-à-dire pour avoir toutes les chances de capter et pour obtenir les meilleurs débits, il faut marier téléphone et opérateur.

En France, chacun des quatre opérateurs dispose d'une licence pour plusieurs bandes de fréquence [4] :

La bande de fréquence 700 MHz (depuis le 5 avril 2016 et selon les régions) ;
La bande de fréquence 800 MHz ;
La bande de fréquence 1 800 MHz ;
La bande de fréquence 2 600 MHz.

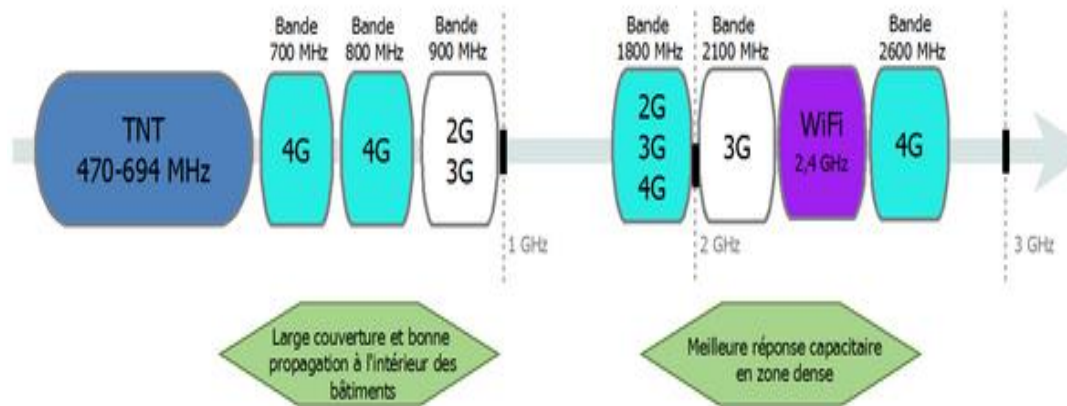


Figure I-2: les bandes des fréquences

Pour quels usages ?

L'augmentation du nombre d'utilisateurs de l'internet mobile (38,5 millions de personnes*) [5] se traduit par une croissance significative du trafic sur les réseaux mobiles d'une année sur l'autre et menace de saturer les réseaux actuels. Le déploiement de nouveaux sites 4G permet de faire face à cette croissance.

Le réseau 4G+ UHD pour Ultra Haut Débit Mobile (ou 4G++) offre un débit au minimum 3 fois plus rapide que la 4G classique que l'on connaît. En pratique, les opérateurs s'appuient sur plusieurs bandes de fréquences, à savoir trois et parfois quatre, qu'ils cumulent pour pouvoir proposer davantage de bande passante. Les smartphones ont commencé à proposer une compatibilité avec la 4G+ UHD à partir des générations suivantes : Galaxy S7 et S7 Edge chez Samsung, iPhone 7 et iPhone 7 Plus pour Apple, ainsi que le Sony Xperia XZ et le Huawei Mate 9.

La 4G++ sert aux consommateurs pour leurs usages nécessitant un maximum de débit. L'Internet des objets est notamment souvent évoqué. Il devrait, dans les années à venir, multiplier le nombre de ces produits communiquant entre eux via Internet.

Pourquoi lancer la 4G ?

L'augmentation du nombre de téléphones intelligents (Smartphones) ainsi que d'autres produits avancés (tablettes, montres...) accroît l'utilisation des données échangées via les réseaux de téléphonie mobiles, notamment avec des applications comme la diffusion de contenu vidéo. Pour améliorer la qualité de service, il a fallu mettre en œuvre de nouvelles technologies supportant les quantités de données échangées [4]. Ainsi les générations de réseaux se succèdent pour soutenir les besoins des utilisateurs.

Global connections by technology
(millions, excluding M2M)

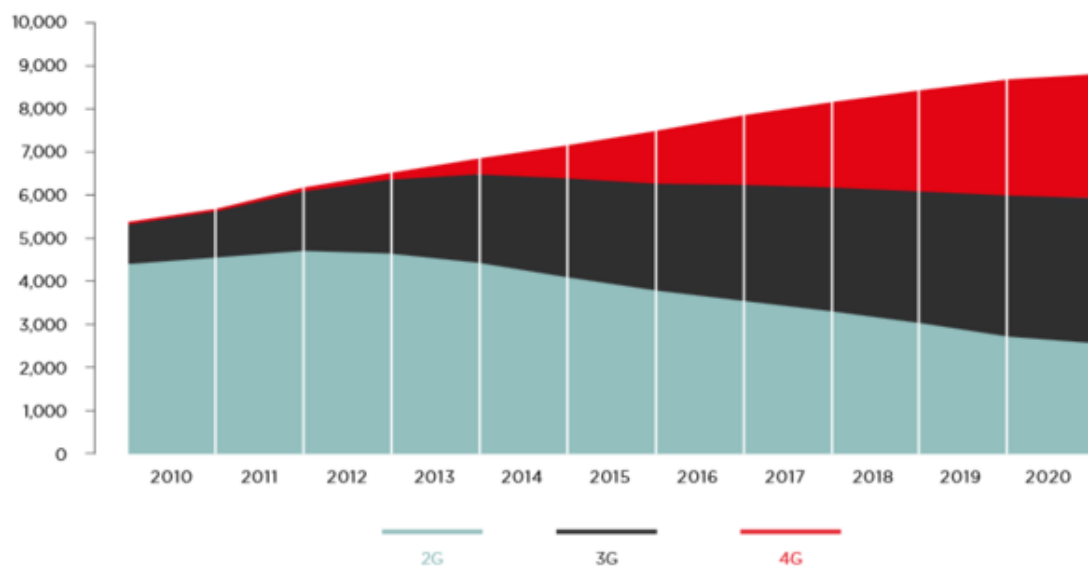


Figure I-3 : Le graphique illustre l'évolution mondiale de ces générations de réseaux de téléphonie mobile [4].

I-3) La cinquième Génération (5G) :

I-3-1) Introduction :

La cinquième génération (5G) de la téléphonie mobile sans fil est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications sans fil. Elle va donc succéder à la 4G. Cette avancée devrait fournir un très grand service en termes de rapidité, de diversité et de facilité. La 5G nous conduira à une « communauté de communication durable » où les appareils mobiles joueront un plus grand rôle dans le changement positif de la vie quotidienne des gens.

La 5G est différente des générations précédentes. Pour la première fois, l'infrastructure physique sera séparée de l'infrastructure logique ou « virtuelle ». Un réseau de type « SDN » (Software Dynamic Networks - réseaux définis par logiciel) sera selon, la demande, mis en place, supprimé, agrandi, ou réduit. La gestion complexe du réseau sera effectuée par apprentissage automatique (Machine Learning ou ML) et au moyen de l'Intelligence artificielle (AI). [6]

La 5G englobe un ensemble de technologies qui constituent la prochaine grande phase des normes de télécommunication mobiles à partir de l'évolution des normes actuelles 4G LTE (évolution à long terme). Le réseau 5G est validé par l'ITU (International Télécommunication Union) et le consortium 3GPP (3rd Génération Partner hip Project). La mise en œuvre des normes devrait entrer officiellement en vigueur vers 2020.



Figure I-4 : l'évolution de la téléphonie mobile.

Comparaison entre les différentes générations :

Le tableau ci-dessous résume les vitesses des réseaux mobiles des différentes générations [6] :

1G	2.4Kbps	
2G	64Kbps	26X
3G	2 000kbps	31X
4G	100 000Kbps	50X
5G	100 000 000Kbps	1000X

Tableau I -2 : vitesses permises par les différentes générations de réseaux.

I-3-2) Comparaison entre 4G et 5G :

Quand il y a peu d'interférences ou pas d'autres dispositifs à proximité, le dispositif de la 5G pourra atteindre des vitesses de pointes.

La 5G est 20 fois plus rapide que la 4G.

Sa vitesse de téléchargement maximale est de 20Gb/s tant dis que la 4G n'est que de 1Gb/s.

Un film de 800Mo qui prenait environ 40 secondes à télécharger en 4G ne prendra plus qu'une seconde avec la 5G.

La 5G sera beaucoup plus utilisé en M2M (communication de machine à machine)

Les données sont beaucoup plus simples à comprendre.

La puissance qu'elle émettra pourra contrôler sa puissance afin de ne pas polluer l'environnement.

-Une augmentation de l'efficacité énergétique.

- Une connexion stable même en mobilité

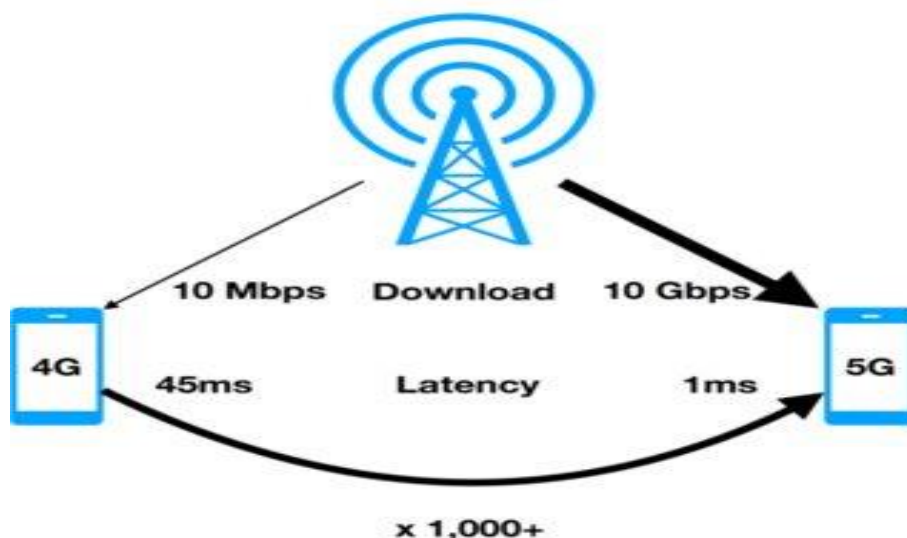


Figure I-5: la comparaison entre 4G et 5G.

I-3-3) Applications visées pour le réseau de 5G :

La 5G fournira la connectivité sans fil pour un large éventail, La 5G va pénétrer dans chacun des éléments de notre société future et créer un écosystème d'information multidimensionnel centré sur l'utilisateur. Elle va briser la limitation de temps et d'espace pour permettre une expérience utilisateur immersive et interactive. La 5G raccourcira également la distance entre l'homme et les choses, et mettre en œuvre une intégration transparente pour réaliser une interconnexion facile et intelligente entre les personnes et toutes les choses. 5G nous permet de réaliser la vision : « L'information est à portée de main, et tout sera resté en contact »[7].

Un grand nombre de cas d'utilisation ont été proposés par différentes organisations. L'internet mobile et l'Internet des objets (IoT) sont les deux principaux moteurs du marché de développement futur des communications mobiles [7],[8].

I -3-4) Les fréquences utilisées dans la 5G :

Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre la couverture (définie par la taille de la zone où le service est accessible) et la capacité (caractérisée par exemple par le débit obtenu). Pour assurer une bonne couverture, les fréquences basses sont privilégiées car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation. Pour augmenter la capacité, les fréquences hautes sont préférables car les largeurs de bandes disponibles y sont plus importantes, ce qui permet d'écouler plus de trafic. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à haute fréquence car l'environnement perturbe alors beaucoup la propagation, notamment à l'intérieur des bâtiments du fait d'une forte atténuation par les murs, ce qui limite la couverture. Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des populations et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes.

Dans ce contexte, la 5G disposera d'une gamme élargie pour son déploiement : elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les bandes basses autour de 1 GHz, pour assurer une bonne couverture et se verra également attribuer de nouvelles bandes de fréquences notamment dans les bandes millimétriques, utilisées pour la première fois pour des services grand public, qui permettront d'augmenter la capacité

Pour 5g en particulier, les ressources de spectre doivent être suffisantes pour garantir un débit de données ultra élevé, le problème a une raison d'être plus faible, car les réseaux 2g, 3g et 4g

occupent déjà la majorité des ressources de spectre inférieures à 3 GHz, laissant peu de ressources pour permettre une fourniture continue de large bande cela signifie que 5g, doivent utiliser des ressources de spectre haute fréquence qui sont inoccupées, la spécification 3gpp r15 adoptée divise le SPECTRE 5G EN 2 gammes DE FRÉQUENCES (FR1 ,FR2)[44]

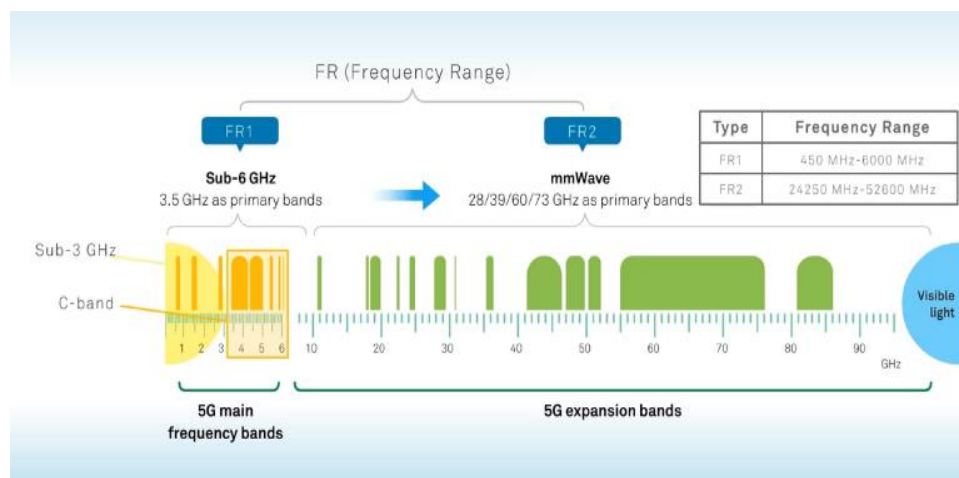


Figure I-6 : les deux gammes de fréquences de la 5G (fr1, fr2)

I -3-4-1) le FR1 ou bien sub 6 GHz :

C'est la bande principale du réseau 5G dans cette bande nous trouvons les deux fameuses bandes :

- 1-Sub 3GHz, les fréquences inférieure à 3GHz, déjà utilisé dans les réseaux précédents
- 2-La band C, les fréquences entre 3.5 et 6 GHz, c'est la bande principale dans le réseau 5G

La démonstration de Ericsson :

Ericsson a atteint ce qu'il appelle « une nouvelle référence de performance » sur son réseau en bande C en direct avec la technologie MIMO multiutilisateurs de liaison descendante 16 couches, offrant une efficacité spectrale améliorée.

La démonstration, avec 16 couches MU-MIMO à 256 QAM avec 8 appareils sur 100 méga Hertz de spectre en bande C, qui a eu lieu au siège nord-américain de la société à Plano, au Texas, a atteint une capacité cellulaire de pointe de 5,4 Gbps [45].

Signaux Research Group et T-Mobile US ont réalisé des tests de performances supplémentaires sur le réseau Ericsson.

T-Mobile US a déclaré que dans un canal de 100 mégahertz de 2,5 GHz, il a connecté huit Smartphones OnePlus 8 5G à la même radio et aux mêmes ressources 5G, et grâce à l'utilisation de MU-MIMO et de la formation de faisceau, il a pompé plus de 700 Mbps à travers chaque appareil : 16 flux de données uniques, chaque flux pouvant atteindre plus de 350 Mbps, et deux flux de données pour chaque appareil. Le site de l'antenne était au sommet d'un bâtiment et les appareils étaient dispersés dans le parking en contrebas.

La bande C se compose de 500 mégahertz entre 3,7- 4,2 GHz, ou spectre moyen, ce qui la rend critique pour le déploiement de la 5G, en particulier aux États-Unis qui a soif de ce spectre qui offre une meilleure couverture que la bande millimétrique (mmWave), ou spectre à bande haute. Selon Ericsson, le spectre à moyenne bande est nécessaire pour fournir des cas d'utilisation de la 5G tels que des usines connectées, des villes intelligentes et des jeux en réalité virtuelle.

Le débit démontré par le réseau de démonstration Ericsson établit une nouvelle référence pour les performances du réseau 5G et présente les avantages qui seront disponibles sur le marché

lorsque les réseaux à moyenne bande seront disponibles [46].

I -3-4-2) La bande millimétrique, le FR2 :

Ce qui caractérise la plus la nouvelle technologie c'est la bande de fréquence utilisée, La 5G devrait utiliser en partie des bandes de fréquences supérieures à 24GHz. Ces ondes millimétriques, correspondent à des fréquences 10 à 30 fois plus élevées que celles actuellement utilisées par les réseaux mobiles.



Figure I-7 : Les fréquences utilisées dans la 5G

I-3-5) Les avantages de la 5G :

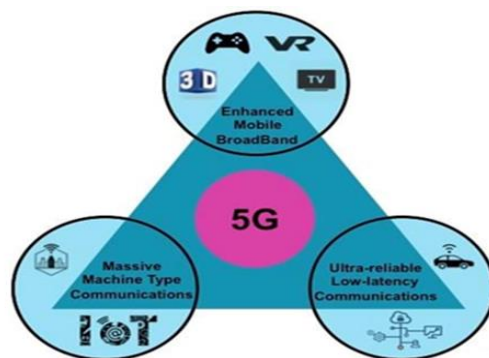


Figure I-8 : Les avantages de la 5G

- Le MBB pour enhanced Mobile Broad Band, c'est-à-dire des communications mobiles ultra haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.
- Le mMTC pour massive Machine Time Communication, c'est-à-dire les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.

• L'URLLC pour ultra Reliable Low latency Communication, c'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être la plus rapide possible [9].

I-4) Technologies émergentes pour réseaux 5G :

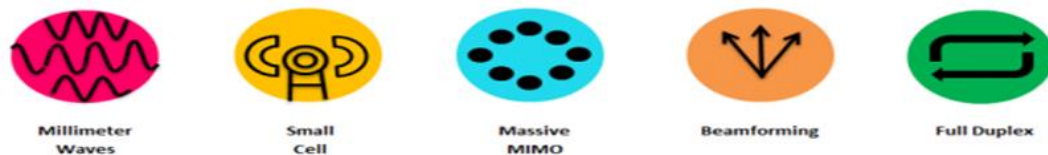


Figure I-9 : Technologies Émergentes Pour réseaux 5G

Découpage en tranches du réseau 5G : Le découpage en tranches du réseau 5G permet aux fournisseurs de services de créer des réseaux virtuels de bout en bout répondant aux besoins des applications [10].

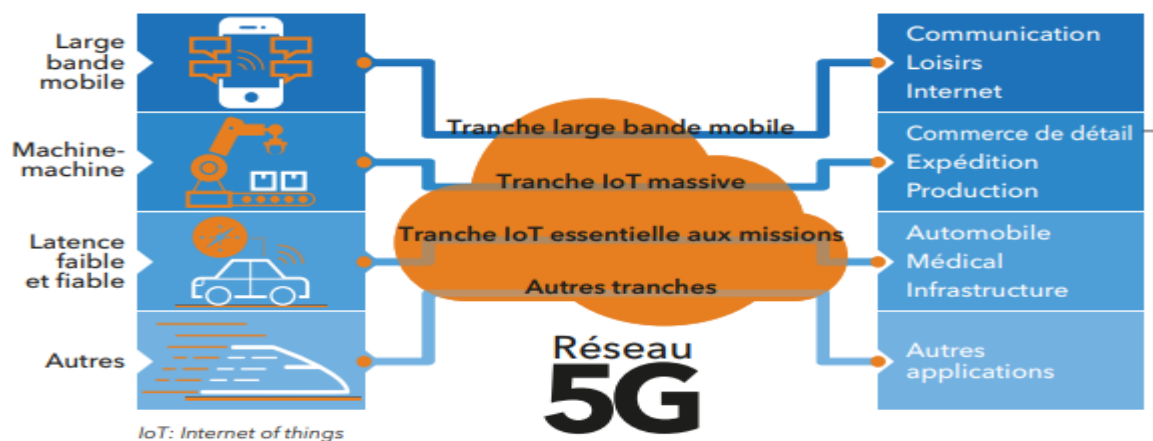


Figure I-10 : Découpage en tranches du réseau 5G

I-4-1) Beamforming :

Beamforming est le processus de filtrage spatial ; l'objectif principal du filtrage spatial est de rendre un faisceau sensible vers le signal d'intérêt (SOI) et nul ou atténuation vers les directions de signaux interférents ou signaux sans intérêt (SNOI). Il existe différentes méthodes de mise en œuvre techniques de formation de faisceaux, domaine temporel et fréquentiel qui dépend de la vitesse de traitement et du type de signaux à traiter [11].

-La technique du beamforming (filtrage spatiale) consiste à focaliser un signal sans fil vers un dispositif de réception spécifique, au lieu de le diffuser dans toutes les directions à partir d'une antenne radio, comme c'est habituellement le cas. La connexion, plus directe, est plus rapide et plus fiable qu'elle ne le serait sans formation de faisceau.

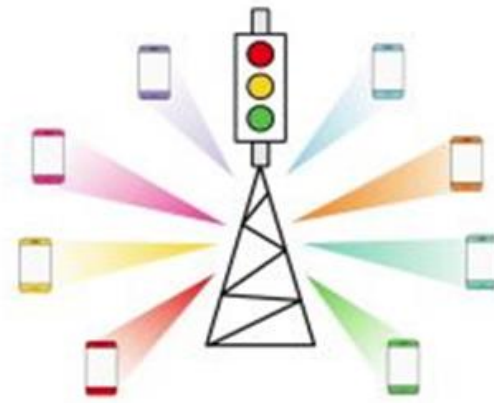


Figure I-11: Technologie Beamforming

I-4-2) Millimeter Waves:

Le spectre des micro-ondes, qui a été utilisé pour la plupart des réseaux commerciaux, est actuellement presque entièrement occupé. Heureusement, il existe un large spectre disponible dans la gamme des ondes millimétriques. Cette partie du spectre comprend des fréquences de 30 à 300 GHz avec des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre (de 1 à 10 mm), qui est destinée à être exploitée pour des futures communications mobiles et nombreuses applications, y compris le transfert de données à haute vitesse, l'imagerie radar, le dépistage de sécurité, l'identification de substances ainsi que beaucoup d'autres.

Les microcellules :

Les petites cellules ou plus précisément les UDN (Ultra Dense Network) des petites cellules promettent de jouer un rôle central dans la 5G en tant que puissante réponse à la densification du réseau et au besoin d'augmentation massive de l'efficacité spectrale ou du débit binaire par unité de surface. Les petites cellules sont également un composant essentiel des réseaux hétérogènes (Het Nets). Les estimations évoquent pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G. Un nombre d'au moins 10 petites cellules par macro site, dans un environnement urbain où les cellules sont déjà relativement serrées, peut faire face à la densité d'utilisation

I-4-3) Massive MIMO :

Les systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) massifs ou grands sont un symbole important dans les technologies 5G. Ils sont communément appelés systèmes utilisant un grand nombre d'antennes intelligentes [11]. Massive MIMO peut offrir les avantages suivants :

Caractéristiques principales [12] :

- De nombreuses antennes BS, Par exemple : $M = 200$ antennes, $K = 40$ utilisateurs à antenne unique
- Beaucoup plus d'antennes que d'utilisateurs : $M \gg K$
- Haute efficacité spectrale
- De nombreux utilisateurs simultanés
- Signaux directive forts
- Peu de fuites d'interférence

Seminal work: Thomas L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas, IEEE Trans. Wireless Communications, 2010

- ✓ Combines the best concepts from past decades of multi-user MIMO research
- ✓ 2013 IEEE Marconi Prize Paper Award, 2015 IEEE W. R. G. Baker Award

MIMO massif pour 5G en dessous de 6 GHz :

1) Mobile broadband applications

- Très haute efficacité spectrale, multiplexage de nombreux utilisateurs
- De grandes améliorations au bord de la cellule

2) Ultra-reliable low-latency communication (URLLC)

- Channel hardening alleviates small-scale fading
 - Fewer retransmissions, more predictable performance
- Massive machine-type communication (mMTC)
- Extend coverage, more cost-efficient deployment
 - Reduce transmit power for battery-power devices

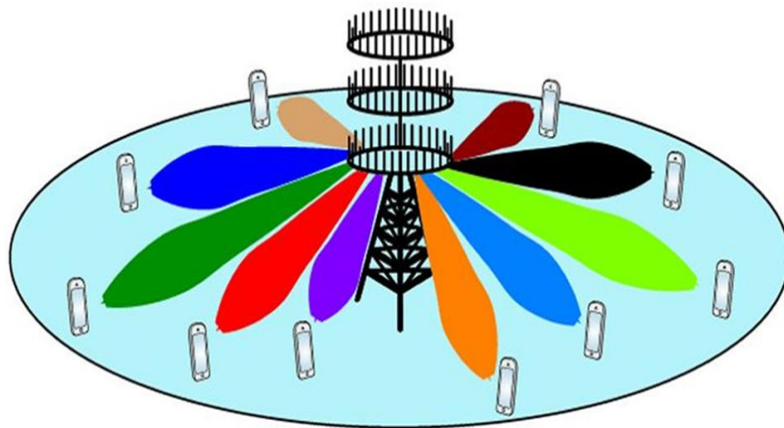


Figure I-12 : Massive mimo

Il existe quatre modèles de configuration d'antenne de base qui incluent [7] :

- ✓ SISO - Single Input Single Output
- ✓ SIMO - Entrée unique Sortie multiple
- ✓ MISO - Sortie unique à entrées multiples
- ✓ MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

I-4-4) Multiplexage NOMA :

La technologie LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné. Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G par rapport à la 4G des méthodes de multiplexage non orthogonale, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA : Sparse Code Multiple Accès, CDMA : Code Division Multiple Accès) [13].

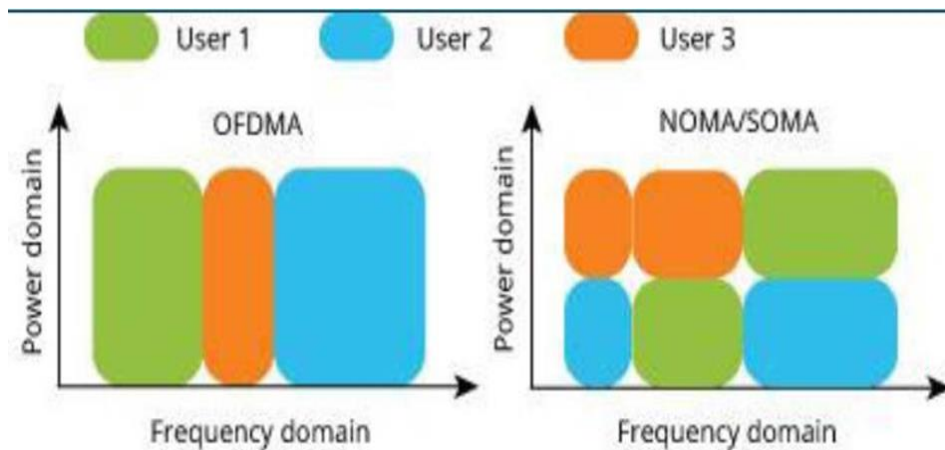


Figure I-13: Multiplexage NOMA

Plusieurs utilisateurs sont couplés et partagent les mêmes ressources radio, que ce soit en temps, en fréquence ou en code. Chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G.

I-4-5) Un duplex plein (Full duplex) :

Le mode full-duplex a fait l'objet de tests lors de la première phase des essais 5G. D'après les premiers tests, ce mode permet la transmission et la réception simultanées des données au niveau de la station de base, avec trois niveaux de technologie en cascade, à savoir l'annulation analogique passive, l'annulation analogique active et l'annulation numérique. Les tests ont prouvé que le full-Duplex permet d'optimiser l'annulation des auto-interférences de plus de 113 dB en situation réelle, ce qui assure une augmentation de 90 % du débit du système par rapport aux modes (half-duplex) traditionnellement utilisés.

Le duplexage complet est destiné à permettre la transmission et la réception simultanées d'informations à la même fréquence, au même moment et au même endroit.

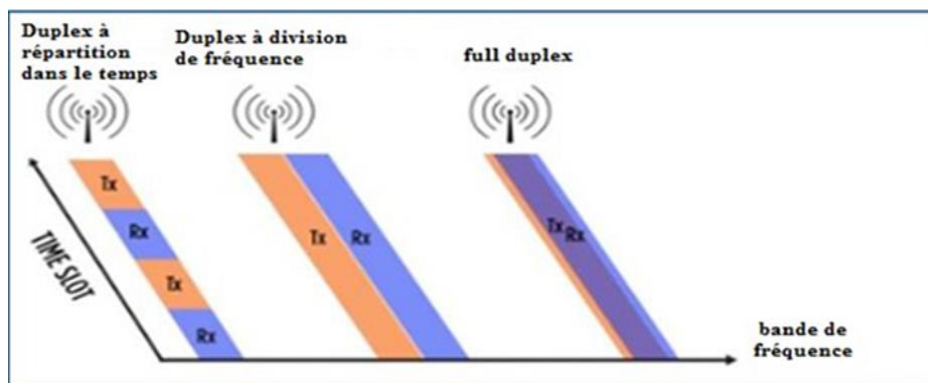


Figure I-14 : Duplex plein (Full duplex)

I-4-6) La technologie NR :

New Radio Répondre aux exigences mentionnées nécessite des changements radicaux dans le modèle du réseau en plus d'innovations perturbatrices. Dans ce contexte, les réseaux 5G peuvent faire appel à un large éventail de nouvelles technologies. Cela permet un saut dans les performances qui éclipse ses prédécesseurs. Ces innovations toucheront la transmission et la conception de la couche physique en plus d'introduire des bouleversements dans les couches

réagir aux paquets entrants et aux flux [16]. Le SDN facilite la configuration, la mise à l'échelle et la gestion de l'infrastructure déployée de réseau.

I-4-11) Network Fonction Virtualisation (NFV):

Le NFV est le complémentaire du SDN. Il promet d'importantes économies de coûts, de flexibilité et de facilité dans le déploiement de l'infrastructure réseau. Le NFV s'appuie sur l'infrastructure de centre de données qui alimente d'une manière très efficace de nombreux services d'applications Internet, tels que Google et Amazon.

I-4-12) Cloud RAN (C-RAN):

Le C-RAN est aussi connu sous le nom de RAN central. C'est une évolution en SDN. L'architecture de C-RAN décompose la station de base traditionnelle en deux entités ; des têtes radio distantes placées sur les sites cellulaires et des unités de traitement bande de base (BBU) mises en communs dans un pool centralisé. Les deux entités sont liées au moyen d'un réseau de fibre optique (Fibre Radio).

Cette nouvelle technologie permet d'augmenter la capacité et la couverture de réseau. Elle permet également une gestion globale des ressources, une gestion efficace des interférences et une meilleure utilisation de la technologie d'accès radio (RAT).

CONCLUSION :

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaisons filaires. Grâce à ce type de réseau, un utilisateur (abonné) a la possibilité de rester connecté au réseau tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on parle de « mobilité ». Ces réseaux sont basés sur une liaison.

Comme nous l'avons vu dans le présent chapitre, l'intégration des réseaux de la 5G est très prometteuse pour un monde plus intelligent, plus sain, et plus confortable grâce à l'application de technologies et d'outils de pointe et de mises à jour à tous les niveaux.

Certaines tendances typiques sont résumées comme suit :

Croissance explosive du trafic de données : il y aura une croissance énorme du trafic. Le trafic mondial de données augmentera de plus de 200 fois entre 2010 et 2020 et d'environ 20 000 fois entre 2010 et 2030.

Augmentation significative des appareils connectés : alors que les principaux appareils personnels devraient rester des téléphones intelligents. Le nombre des autres types d'appareils, y compris les appareils portables et les appareils MTC, continue d'augmenter.

Poursuite de l'émergence de nouveaux services : différents types de services seront exploités, tels que les services fournis par les entreprises, les industries verticales, les sociétés Internet, ... etc.

La 5G doit également permettre d'arrivées de nombreuse innovation supporter la connexion de l'ensemble des véhicules autonomes et connectés, permettre de développement de la santé.

*Chapitre II : Canal de propagation
et diversité*

II-1) Introduction :

Les environnements dans lesquels se propagent les ondes électromagnétiques constituent l'une des caractéristiques majeures des communications sans fil. Ils sont le plus souvent de type multi-trajets à cause des phénomènes de réflexion et de diffraction provoqués par les objets les constituant. Ceci peut entraîner un phénomène d'évanouissement des signaux reçus et altérer ainsi la qualité des communications. Plusieurs techniques sont utilisées afin de lutter contre ce phénomène, parmi lesquelles celle de la diversité d'antennes, où plusieurs antennes sont placées à la réception.

Si on prend pour exemple un téléphone portable, l'intégration de plusieurs antennes est limitée non seulement par un volume restreint mais nécessite en plus une forte isolation entre ces antennes pour maximiser le gain de diversité et/ou d'accroître la capacité de transmission du système global, ce qui constitue un nouveau challenge. De ce fait, les opérateurs et fabricants de téléphones mobiles tentent d'évaluer, par des mesures standardisées, les performances des systèmes multi antennes.

Cette évaluation doit être effectuée dans des environnements réalistes. Cependant, les mesures dans ces environnements sont très fastidieuses et présentent un coût élevé. C'est pourquoi l'émulation, en environnement maîtrisé, des canaux de propagation multi-trajets qui représentent des conditions équivalentes aux environnements réalistes est importante.

Dans ce chapitre nous allons parler du canal de propagation, de la propagation en espace libre ainsi que la propagation multi –trajets en milieu réel où la qualité de la communication peut être fortement affectée. Nous parlerons aussi des solutions avec la diversité et la technique MIMO (Multi Input Multi Output).

II-2) Le canal de propagation :

Un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal électrique émis $e(t)$ en signal électrique reçu $s(t)$ par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Le canal de propagation est l'endroit qui transforme les ondes électromagnétiques lors de leur propagation. À ce stade, il est important de différencier le canal de propagation, qui ne tient en compte que des interactions du signal émis avec l'environnement traversé et le canal de transmission, qui inclut en plus les effets induits par les antennes émettrice et réceptrice comme le montre la Figure II-1.

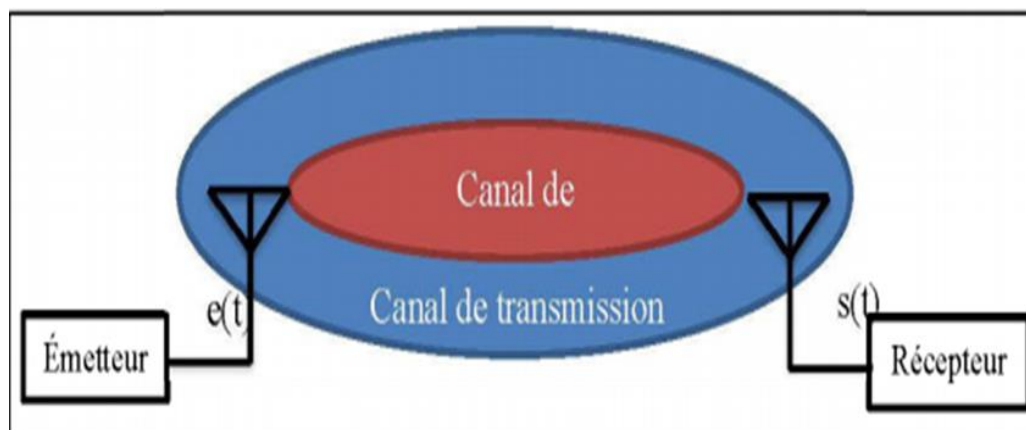


Figure II-1 : Schéma synoptique d'une chaîne de communication.

II-3) les principaux phénomènes de propagation :

Réflexion : La réflexion survient lorsqu'une onde électromagnétique frappe une surface lisse de très grandes dimensions comparées à sa longueur d'onde. Le sol, les bâtiments et les murs sont des sources de réflexion courantes.

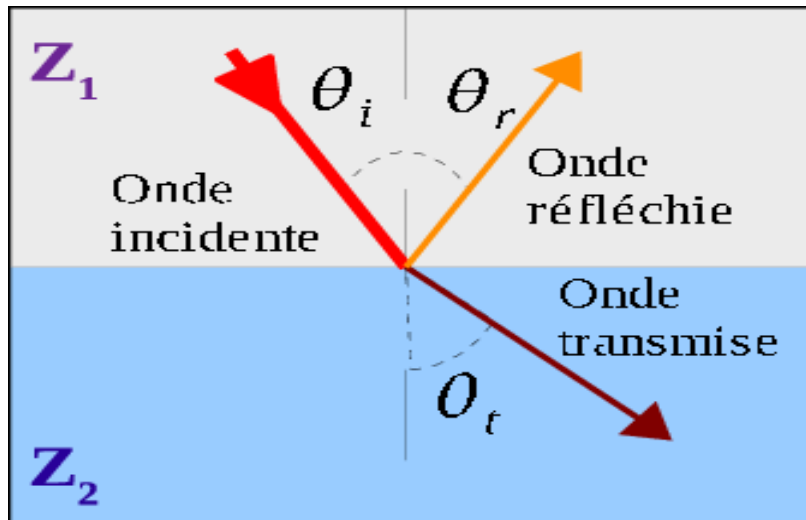


Figure II-2 : la réflexion

Diffraction : se produit lorsque l'OEM rencontre une arête, le sommet anguleux ou pointu d'un objet ou une surface courbe. Le point de direction peut alors être considéré comme une source secondaire rayonnant sur un cône [17]. Le champ diffracté se calcule selon le principe de Huygens, qui considère chaque point du front d'onde éclairant un obstacle comme une source secondaire sphérique. Ainsi, les ondes diffractées se répartissent de façon radiale par rapport à l'arête diffractant, selon un cône dont l'angle correspond à l'angle d'incidence.

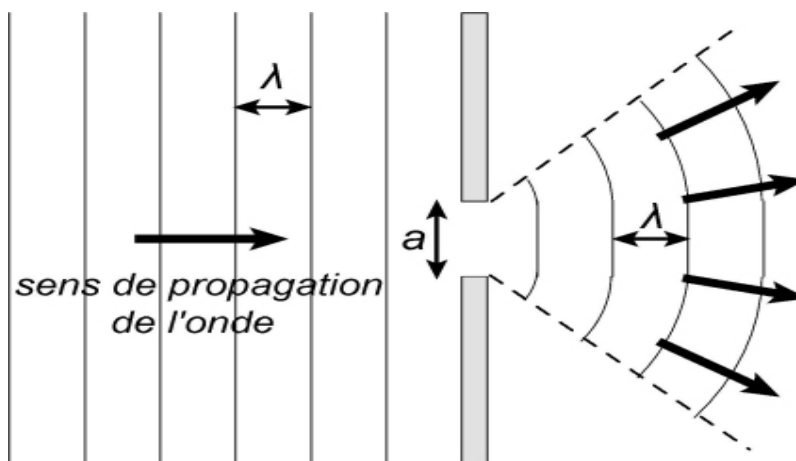


Figure II-3 : la diffraction

Diffusion : Lorsqu'une onde électromagnétique rencontre un groupe dense d'obstacles dont les dimensions sont petites par rapport à la longueur d'onde, le phénomène observé correspond à la superposition d'un grand nombre de diffractions aléatoires. Dans ce cas, on traite le comportement de l'onde incidente de façon statistique et on parle de diffusion. Nous

considérons généralement que l'onde est redirigée dans toutes les directions avec une atténuation variable. Ce phénomène, le plus souvent observé en extérieur au contact de feuillages par exemple, peut se produire en intérieur sur un ensemble d'objets domestiques de petite taille.

La dispersion : Le mécanisme de diffusion crée une dispersion d'énergie dans toutes les directions. Les fenêtres, le feuillage et les panneaux de signalisation sont des diffuseurs potentiels.

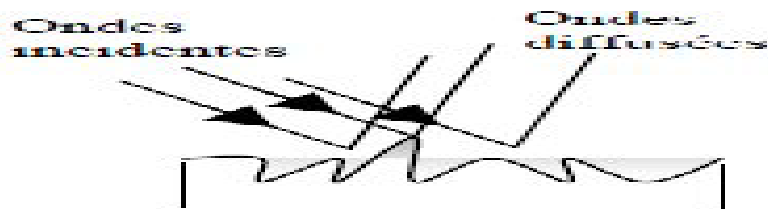


Figure II-4 : la dispersion

La réfraction : Le phénomène de transmission, encore appelé réfraction, traduit le passage d'une onde d'un milieu à un autre dont l'indice est différent. Dans le cas où le second milieu est d'épaisseur finie, l'onde est à nouveau réfractée dans le premier milieu et traverse ainsi l'obstacle [18]

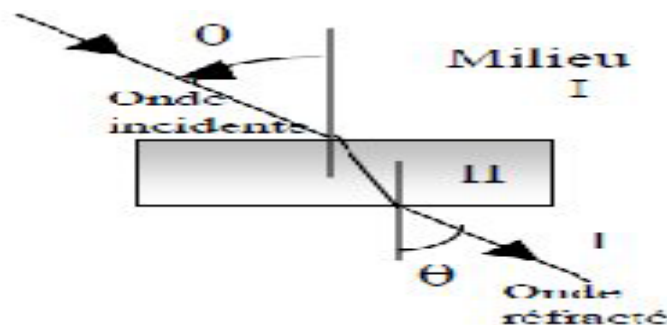


Figure II-5 : la réfraction

Principales dégradations de la propagation [19] :

Si on analyse la puissance du signal reçu en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on distingue trois types de variations de la puissance reçue :

- Affaiblissement de parcours : dû à la distance.
- L'ombrages ou évanouissement lent (shadowing ou slow fading): des variations lentes dues aux atténuations successives produites par de gros obstacles locaux qui causent de la diffraction.
- Évanouissement rapide ou à multi trajets (fast fading ou multipath fading): produit par les variations rapides, causées par les trajets multiples. Il est dû à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut pas être déterministe.

II-4) propagation en espace libre :

Le modèle de propagation en espace libre suppose qu'une antenne d'émission et une antenne de réception sont situées dans un environnement assimilé au vide. Ni les obstacles absorbants ni les surfaces réfléchissantes ne sont pris en compte. En particulier, l'influence de la surface de la terre est supposée totalement absente.

Aux fins de la radiocommunication, l'espace libre est défini comme un vide parfait qui peut être considérée comme une étendue infinie dans toutes les directions, de sorte que la propagation en espace libre est la propagation d'une onde radio rayonnant dans l'espace libre.

Généralement, l'environnement de propagation a une influence sur l'onde électromagnétique émise. En espace libre (qui est caractérisé par l'absence d'obstacles), cette onde se propage de l'émetteur jusqu'au récepteur en ligne directe. D'après l'équation de transmission de FRIIS, la puissance reçue P_R s'écrit de la manière suivante [20]:

$$P_R = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_e G_e G_r \frac{c^2}{16\pi^2 d^2 f^2}$$

Où :

P_e est la puissance émise

G_e : le gain de l'antenne émettrice.

G_r : le gain de l'antenne de réception.

λ : est la longueur d'onde du signal à la fréquence de travail.

d : est la distance entre les antennes.

c : la vitesse de la lumière qui s'exprime comme $c = f \lambda$

Il convient de noter que la formule ci-dessus n'est pas valable que lorsque l'antenne de réception est considérée dans le champ lointain de l'antenne d'émission. Cette condition est vérifiée lorsque la distance (d) entre les antennes est supérieure à la distance de Fraunhofer (d_f) qui est reliée à la plus large dimension (D) de l'antenne d'émission par :

$$d_f = 2 \frac{D^2}{\lambda}$$

L'affaiblissement en espace libre est donné par la relation suivante : $P_L = 10 \log_{10}(P_t/P_R)$
 P_t la puissance transmise.

La perte en espace libre se produit lorsque le signal se déplace dans l'espace sans qu'aucun autre effet n'atténue le signal, il diminuera toujours au fur et à mesure qu'il s'étale. Cela peut être considéré comme le signal de radiocommunications qui se répand comme une sphère toujours croissante. Comme le signal doit couvrir une zone plus large, la conservation de l'énergie nous indique que l'énergie dans une zone donnée diminuera à mesure que la zone couverte deviendra plus grande.

II-5) Propagation par trajets multiples :

Dans un système sans fil, l'environnement du système de transmission interfère avec l'onde transmise selon différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir le même signal de plusieurs trajets différents puisque les signaux transmis peuvent se réfléchir sur une surface comme le sol, les bâtiments ... etc. Dans la pratique, il est fréquent que deux ou plusieurs phénomènes s'appliquent simultanément au trajet d'un signal. Cet effet est appelé propagation par trajets multiples. En effet, il existe cinq phénomènes principaux la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal [21].

La propagation en espace libre représente un cas idéal. Mais en réalité, le canal de propagation

est l'endroit de multi trajets à cause des obstacles qui entourent l'émetteur et le récepteur (Figure II.6). Dans ce cas, plusieurs répliques du signal émis arrivent au récepteur à travers plusieurs trajets qui possèdent différents états d'atténuation, de déphasage et des retards (dus à la longueur du trajet).

Le grand nombre de chemins de signaux différents provient du fait que les signaux sont des réflexions provenant de bâtiments, de montagnes ou autres surfaces réfléchissantes, y compris l'eau, etc. qui peuvent être adjacentes au chemin principal. De plus, d'autres effets tels que les réflexions ionosphériques donnent lieu à une propagation par trajets multiples, tout comme les conduits troposphériques [22].

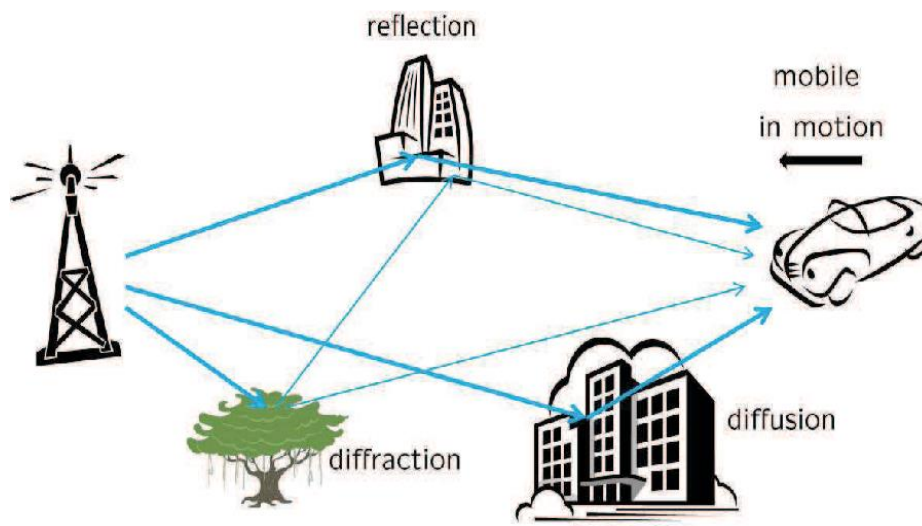


Figure II-6 : Propagation par multi-trajets dans un environnement

Les antennes utilisées pour l'émission et la réception ont un effet sur le nombre de chemins que le signal peut emprunter. Les antennes non directives irradieront le signal dans toutes les directions, tandis que les antennes directives concentreront la puissance dans une direction en réduisant la force des signaux réfléchis loin du faisceau principal.

La propagation par trajets multiples résultant de la diversité des trajets de signaux qui peuvent exister entre l'émetteur et le récepteur peut donner lieu à des interférences de diverses manières, notamment la distorsion du signal, la perte de données et les évanouissements par trajets multiples.

Les obstacles parallèles provoquent un déplacement global des ondes électromagnétiques selon la direction de guidage. Ce phénomène se produit également en environnement urbain, en raison de s immeubles bordant les rues étroites.

Le signal total reçu n'est que l'interférence entre des trajets multiples qui peut se faire de manière constructive ou bien destructive. Cette dernière donne lieu à des évanouissements profonds dépendant de la phase de chacun de signaux élémentaires. Ces évanouissements sont connus par le terme « évanouissements de Rayleigh ». Dans ce cas, comme l'amplitude du signal reçu fluctue très rapidement sur des distances très courtes, une représentation statistique s'impose. Les distributions les plus utilisées sont : Rayleigh, Riceet Nakagami-m

Les bruits multiplicatifs sont générés par le passage de l'onde électromagnétique transmise dans le canal de propagation. De façon purement conceptuelle, ils ont pour origines :

- *L'atténuation de la puissance du signal émis avec la distance parcourue
- *L'évanouissement dû aux obstacles dans le canal de propagation
- *L'évanouissement dit "de Rayleigh".

Génération des coefficients du canal à trajets multiples :

Il y'a deux situations de propagation multi trajets :

-**NLOS (None Line Of Sight)** : dans ce cas il n'y 'a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur [23]. La densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal total reçu la suit la loi de Rayleigh figure (II-7)

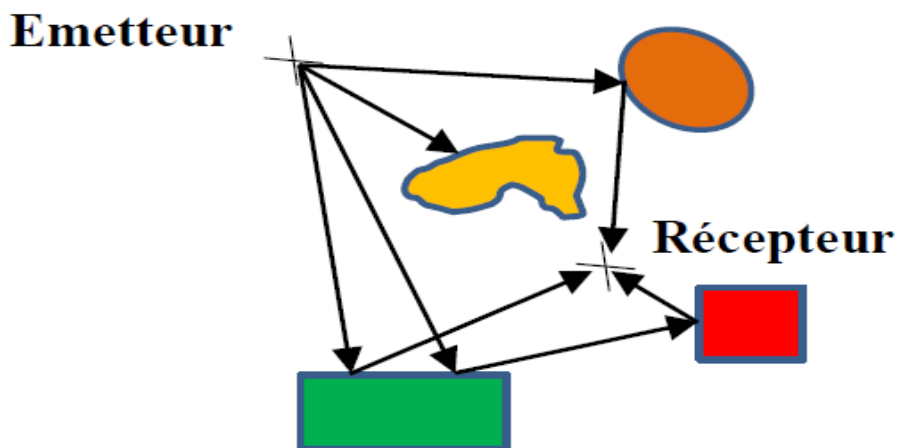


Figure II-7 : Propagation multi-trajets NLOS

-**LOS (Line Of Sight)** : est une situation lorsqu'il y'a un trajet direct et par conséquent l'amplitude d'évanouissement est caractérisée par la distribution de Rice figure (II-8)[23].

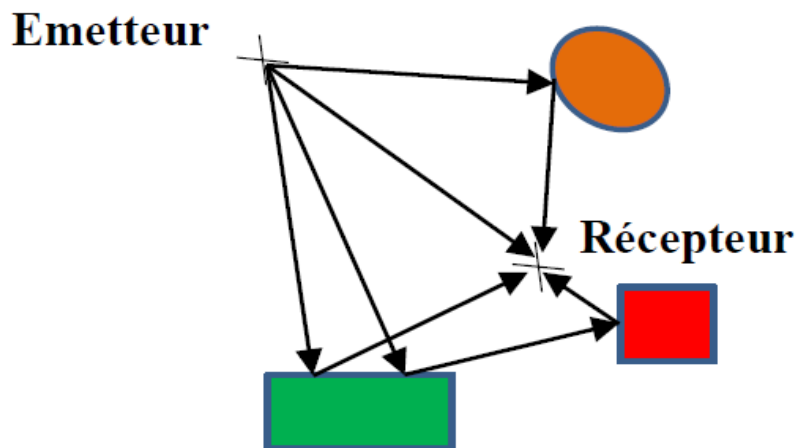


Figure II-8 : Propagation multi-trajets LOS

II-6) Modélisation du canal de propagation :

La description réaliste du canal de propagation en environnement complexe n'nécessite l'utilisation de modélisations adaptées (figure II-9). Un canal variant dans le temps est représenté par un filtre linéaire ayant comme réponse impulsionnelle $h((\tau, t)$ [24]. Dans le cas d'un canal invariant dans le temps, la réponse impulsionnelle du canal ne dépend pas du temps t et elle peut être caractérisée par $h(\tau)$.

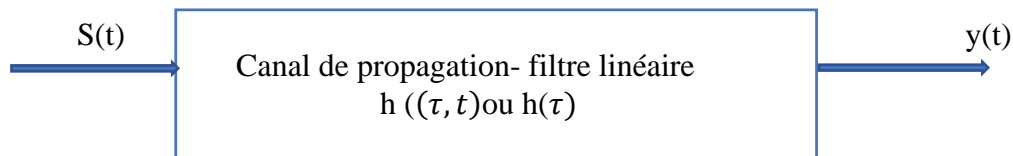


Figure II-9: Représentation en bande de base du canal de propagation.

La réponse impulsionnelle peut s'écrire de la manière suivante :

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^k A_k(t, \tau) \exp(j\psi_k(t, \tau)) \delta(T - \tau_k(t))$$

Avec :

K : trajet de l'onde, A_k : une atténuation, ψ_k : déphasage, et le temps temporelle

Dans le cas d'un filtre passe-bande, le signal émis $s(t)$ est représenté comme suit :

$$S(t) = \text{Re}\{S(t) \exp(j2\pi f_c t)\}$$

II-6-1) La réponse impulsionnelle de canal :

Après avoir présenté les aspects du canal de propagation précédemment, il convient de le modéliser. Dans la plupart des cas, un canal radio est considéré comme un système linéaire variable dans le temps [25], La réponse impulsionnelle est une fonction à la fois de la variable t , qui représente la variation du temps par rapport à une valeur de référence choisie, et de la variable τ qui représente le retard des trajets multiples du canal pour une valeur fixée de t .

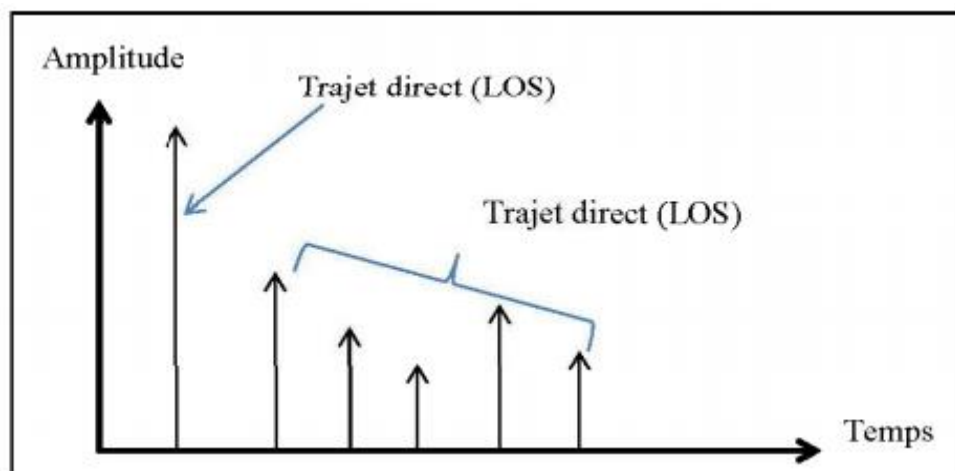


Figure II-10 : Représentation de la réponse impulsionnelle d'un canal radio mobile.

La réponse impulsionnelle est donné par :

$$P_m = \int_{t_0}^{t_3} p(t) dt$$

Où :

$P(t)$: densité de puissance de la réponse impulsionnelle

t : retard en excès

t_0 : instant où $P(t)$ dépasse le seuil de coupure pour la première fois

t_3 : instant où $P(t)$ dépasse le seuil de coupure pour la dernière fois.

Le retard moyen TD est donné par le moment d'ordre un de la réponse impulsionnelle :

$$TD = \frac{1}{P_m} \int_l^{T_d} (t - t_{los}) p(t) dt$$

a- Aspect positif des multi- trajets :

Dans certains cas, les trajets multiples présentent un avantage. Comme dans le cas d'une liaison où l'émetteur et le récepteur ne sont pas en visibilité directe [26], la diffraction et la diffusion prédomine et permet ainsi aux ondes de contourner les obstacles et donc d'assurer la continuité de la liaison radio.

b- Aspect négatif des trajets multiples :

Cette propagation par trajets multiples est à l'origine de plusieurs problèmes qui affectent les trois paramètres (amplitude, phase et fréquence) de l'onde émise de la façon suivante [27] :

Distorsion de phase par la dispersion des retards ou des temps de propagation

Distorsion d'amplitude par l'évanouissement ou le fading de Rayleigh

Décalage en fréquence par effet Doppler.

II-7) Les Variations du canal de propagation :

Lors de la propagation de l'émetteur vers le récepteur, les phénomènes électromagnétiques engendrent plusieurs répliques du signal émis (Propagation multi-trajets). A la réception, ces répliques arrivent à différents instants avec des atténuations et déphasages donnés [24]. On distingue ainsi trois types de variations de la puissance reçue comme l'illustre la FigureII-11

❖ La décroissance moyenne de la puissance reçue est due à l'augmentation de la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

❖ L'évanouissement à grande échelle représentant la fluctuation de la puissance moyenne reçue par un déplacement de l'ordre de la dizaine de la longueur d'onde.

❖ L'évanouissement à petite échelle lié aux interférences constructive et destructive entre les différentes répliques du signal émis au niveau de l'antenne réceptrice.

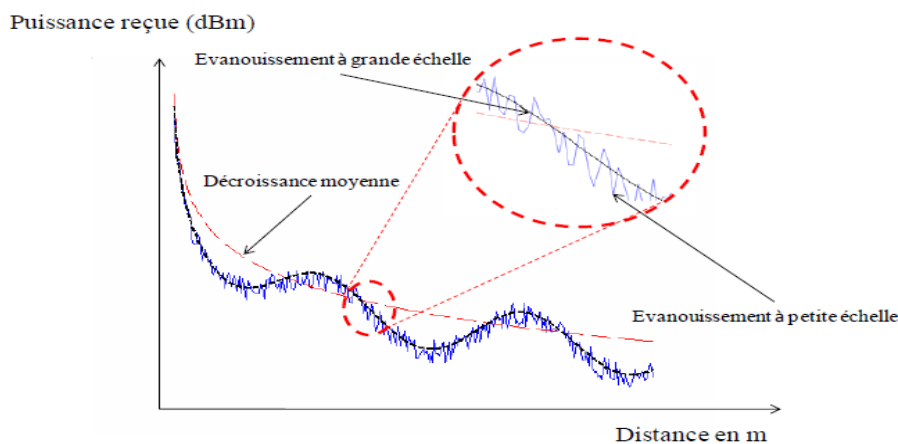


Figure II-11 : les variations du canal de propagation

II-7-1) L'évanouissement (fading) :

Évanouissement (fading) On a quatre types d'évanouissements. Deux sélectif en fréquence dû

à la dispersion temporelle qui comporte les évanouissements plats et les évanouissements sélectifs en fréquence. Les deux autres sont sélectifs en temps dû au décalage Doppler qui comporte les évanouissements lents et les évanouissements rapides.

- **Évanouissements plats** Le canal est considéré comme non sélectif en fréquence si la bande de cohérence du canal B_c est supérieure à la bande occupée par le signal B_s , et la dispersion temporelle σ_{τ} est inférieure à la durée du symbole émis T_s . Dans ce cas, on peut considérer que

Le spectre de signal reçu est corrélé et que toutes les fréquences du spectre du signal subissent les mêmes amplifications ou atténuations.

- **Évanouissements sélectifs en fréquence** Le canal est considéré comme sélectif en fréquence lorsque la bande de cohérence du canal B_c est inférieure à la bande occupée par le signal B_s , et la dispersion temporelle σ_{τ} est supérieure à la durée du symbole émis T_s . Dans ce cas, on peut considérer que le spectre de signal reçu est décorrélé.
- **Évanouissements lents** Le canal est alors non sélectif en temps si le temps de cohérence du signal T_c est supérieur à la durée du symbole émis T_s , la bande occupée par le signal B_s est supérieure au décalage Doppler. Dans ce cas, la réponse impulsionnelle du canal reste constante sur plusieurs symboles consécutifs.
- **Évanouissements rapides** Le canal est sélectif en temps si le temps de cohérence du signal T_c est inférieur à la durée du symbole émis T_s et la bande occupée par le signal B_s est inférieure au décalage Doppler. Dans ce cas, la réponse impulsionnelle du canal varie de façon significative pendant la durée d'un symbole.

II-7-2) Multipath fading basics :

L'évanouissement par trajets multiples est une caractéristique qui doit être prise en compte lors de la conception ou du développement d'un système de radiocommunications. Dans tout système de radiocommunication terrestre, le signal atteindra le récepteur non seulement par le chemin direct, mais également en raison des réflexions d'objets tels que les bâtiments, les collines, le sol, l'eau, etc. qui sont adjacents au chemin principal.

Le signal global au niveau du récepteur radio est une sommation de la variété des signaux reçus. Comme ils ont tous des longueurs de chemin différentes, les signaux s'ajouteront et se soustrairont du total en fonction de leurs phases relatives.

Parfois, il y aura des changements dans les longueurs relatives des chemins. Cela pourrait résulter du déplacement de l'émetteur ou du récepteur radio, ou de tout objet qui fournit une surface réfléchissante en mouvement. Cela entraînera un changement des phases des signaux arrivant au récepteur, ce qui entraînera à son tour une variation de l'intensité du signal en raison de la manière différente dont les signaux seront additionnés. C'est cela qui provoque l'évanouissement présent sur de nombreux signaux.

II -8) La diversité :

Les techniques de diversité sont très utilisées. Les techniques de diversité sont basées sur le principe selon lequel, plusieurs versions statistiquement dés corrélés du signal émis arrivent sur un récepteur, chacune portant en son sein la même information. Elles sont ensuite combinées de façon adéquate de façon à ce que le signal résultant soit moins évanouissant [28].

La diversité d'antennes est un moyen de réaliser l'accès multiple par répartition spatiale (AMRS ou SDMA), puisque l'espace entre les antennes est utilisé pour différencier les signaux. Il peut y avoir plusieurs antennes du côté émission et une seule antenne du côté réception (MISO), une seule antenne du côté émission et plusieurs antennes du côté réception (SIMO), ou plusieurs antennes du côté émission et plusieurs antennes du côté réception (MIMO). Les systèmes fondés sur le MIMO présentent les meilleurs résultats en termes de diversité d'antenne, mais la

complexité du décodage nécessite un émetteur et un récepteur sophistiqués. Dans un environnement toujours changeant, une caractérisation du canal en permanence est nécessaire. De plus, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente, la complexité du canal entre les antennes d'émission et de réception le rend instable et difficile à distinguer, ce qui atténue les effets bénéfiques du MIMO. Les systèmes à antennes d'émission multiples et antenne de réception unique sont assez courants dans les communications sans fil et exploitent la diversité d'antennes pour améliorer leurs performances

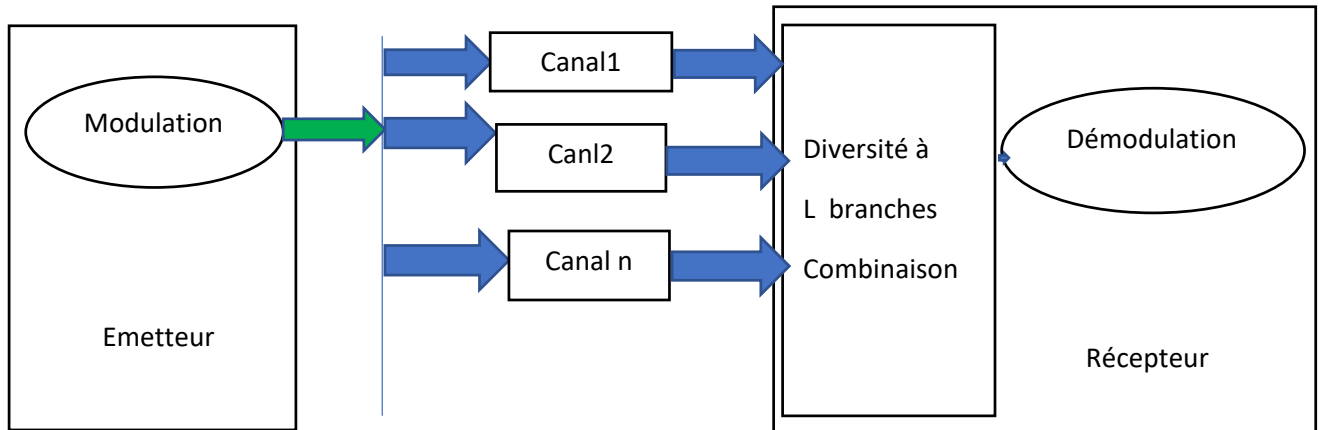


Figure II-12 : Schéma de principe de la diversité

II -8-1) Technique de diversité :

Diversité fréquentielle :

Consiste à transmettre le même signal à deux fréquence porteuses différentes pour obtenir deux versions à évanouissement indépendants du même signal . nécessité d'avoir un canal sélectif en fréquence pour avoir des fadings indépendants.

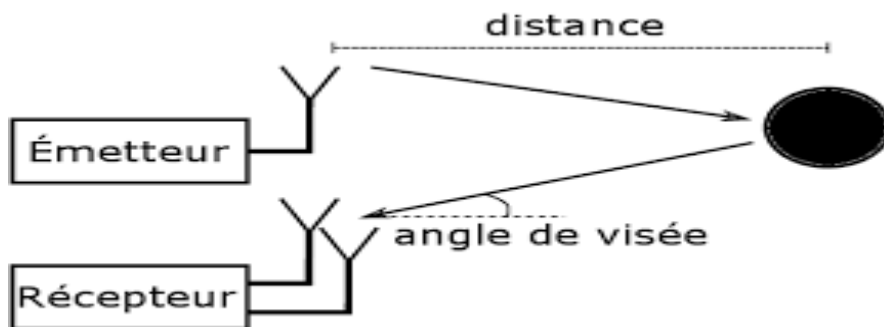


Figure II-13 : diversité fréquentielle

Diversité d'espace (spatiale) :

La diversité d'espace est une technique largement utilisée dans les communications numériques pour combattre les effets des interférences dus aux multi trajets. Cette technique consiste à utiliser plusieurs antennes [24], en émission et/ou en réception du signal sur différents antennes suffisamment espacées pour avoir des fadings indépendants.

L'espacement supérieur à D_c distance de cohérence $D_{cmin} > \frac{\lambda}{2}$

Diversité de polarisation :

La diversité de polarisation a été proposée par Lee et Yeh [29] en partant du fait que la polarisation initiale du signal entre l'émetteur et le récepteur peut être modifiée. Ainsi, on peut capter le signal radioélectrique qui contient les deux composantes de polarisation. Cette technique consiste à utiliser deux antennes de polarisations différentes à la réception. D'autre part, elle est considérée comme une technique alternative à la diversité d'antenne [24]. L'avantage de cette technique réside dans le fait que les deux antennes peuvent être colocalisées. Cela peut réduire de manière significative la taille occupée par le système. Une des techniques de diversité de polarisation la plus populaire est l'utilisation des antennes à double polarisation orientées de +/-45 degré.

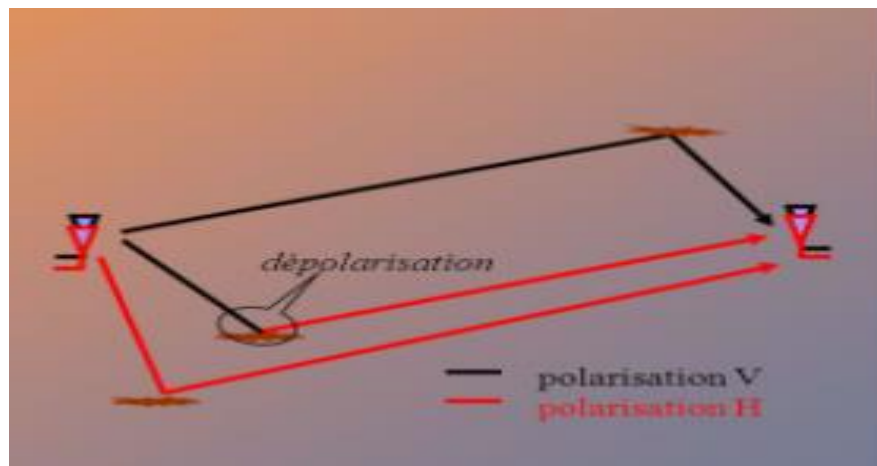


Figure II-14 : diversité de polarisation

Diversité de diagramme :

La diversité de diagramme consiste à utiliser des antennes ayant des diagrammes de rayonnement différents. Dans ce cas, les composantes des trajets multiples sont pondérées différemment sur chaque antenne. De la même façon que la diversité d'espace, la diversité de diagramme permet la colocalisation des antennes [30]. Après avoir cité les différents types de la diversité d'antennes, il convient de noter que l'emplacement des antennes doit être choisi avec précaution dans le but d'assurer un meilleur fonctionnement. Dans ce cas, l'évaluation de leurs performances est primordiale afin de fabriquer des systèmes de communication mobile, en utilisant la diversité d'antenne, de manière efficace.

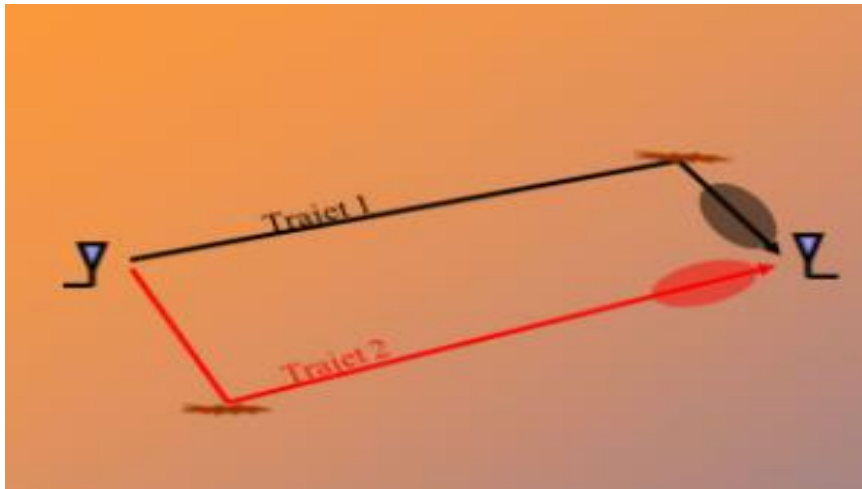


Figure II-15 : diversité de diagramme

II-9) Les systèmes MIMO (multiple input, multiple output) :

La technologie multi input multi output est d'origine de la technologie des communications sans fils divers et la technologie des antennes intelligentes. C'est une combinaison des antennes a plusieurs entrées une seule sortie (MISO) et les antennes d'une seule entrée plusieurs sorties (SIMO) par conséquent elle a les avantages et les caractéristiques des deux technologies 1 et 2. Le système MIMO est équipé de plusieurs antennes en transmission et plusieurs antennes a la réception. Cela améliore la qualité de la communication sans fil et le taux de l'information exponentiellement sans augmenter la bande passante et l'énergie de la transmission le système multi antenne est la partie la plus importante de la technologie MIMO. Le système MIMO sans fil n'est pas juste affecté par les caractéristiques du trajet multiples du canal de communication sans fils mais aussi dépend du désigne et la disposition du système multi antennes.

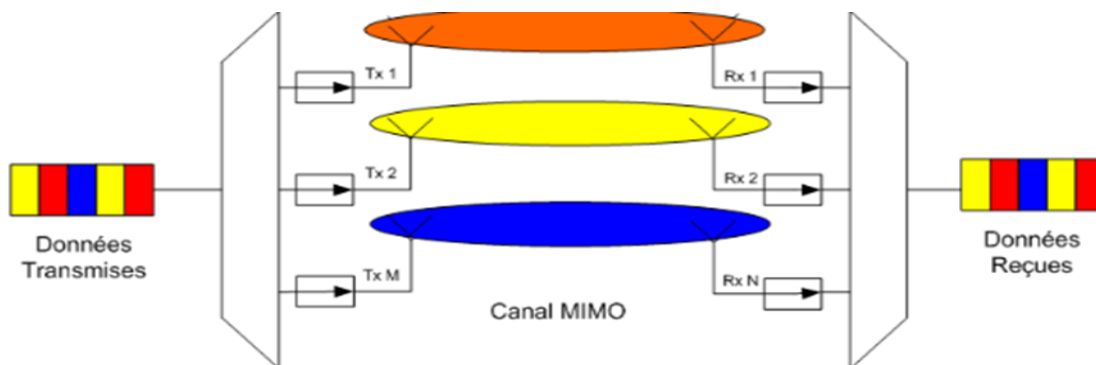


Figure II-16 : Système MIMO

Les systèmes de transmission MIMO utilisent plusieurs antennes en transmission et en réception. Il existe plusieurs configurations dépendamment de la catégorie choisie et du nombre d'antennes utilisées.

Une catégorie de système MIMO est le codage spatio-temporel STC (space time coding). Connue aussi sous le nom de MIMO matrice A. Cette technique de diversité spatiale multiple consiste à envoyer le signal plusieurs fois par plusieurs antennes créant ainsi une redondance dans le temps et dans l'espace afin d'augmenter l'immunité du signal transmis aux phénomènes reliés à la propagation comme les trajets multiples.

Une autre catégorie des systèmes MIMO est le multiplexage spatial (Matrice B). Un signal à haut débit est divisé en sous signaux à débit moins important. Chaque signal est ensuite envoyé sur une antenne différente. Le récepteur crée des canaux parallèles en séparant les signaux reçus en se basant sur leurs signatures spatiales.

La technique MIMO a attiré beaucoup d'attention puisqu'elle augmente considérablement le débit sans bande passante additionnelle et prolonge la couverture radioélectrique sans augmenter la puissance d'émission.

Une des applications de cette technologie est la dernière génération des réseaux WIFI, le standard 802.11n [31]. Il a une portée trois fois plus importante que le WIFI et un débit minimum de 160Mbps, ce qui est sept fois le débit de l'actuel WI FI 802.11. Aussi, la dernière version mobile du standard WiMax 802.16e-2005 supporte le MIMO et le "beamforming" pour former ce qu'on appelle actuellement le WiMax intelligent [25].

II-9-1) Principe de la technique MIMO :

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output), figure II-17. Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes [33].

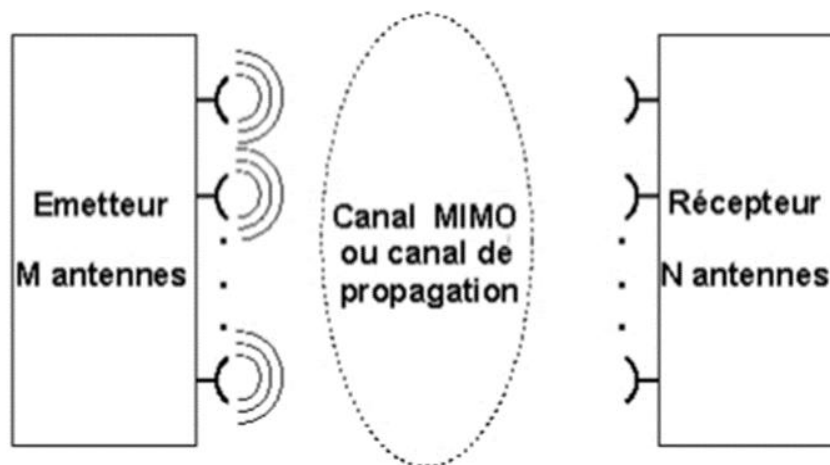


Figure II-17 : Principe de MIMO

Les premières études ont été menées dans les laboratoires Bell [34][33] et depuis, les systèmes MIMO ont suscité un intérêt particulier dans la communauté scientifique. En effet, ils permettent de lutter contre les évanouissements du signal et d'atteindre des efficacités spectrales importantes

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques du canal de propagation. La propagation dans un espace libre sans obstacles est un phénomène idéal, pratiquement irréalisable. Dans le milieu réel, l'environnement interfère avec l'onde transmise selon différents mécanismes causant différents types d'évanouissement résultant de la propagation multi trajets. La variété des trajets de signaux peut être utilisée à bon escient par les techniques de diversité. La diversité des antennes est une technologie très répandue dans la dernière génération de télécommunication mobile. Des schémas tels que MIMO utilisent la propagation par trajets multiples pour augmenter la capacité des canaux qu'ils utilisent ou cherchent à améliorer le rapport signal sur bruit.

Dans ce chapitre le principe de fonctionnement et les avantages des systèmes MIMO sont présentés.

*Chapitre III : les réseaux d'antennes
à éléments multiples utilisés
Pour la 5G*

III-1) Introduction :

À mesure que le nombre de systèmes, de réseaux et d'utilisateurs augmentaient au fil des années de développement des systèmes de communication sans fil, la capacité de pouvoir contenir ces nombres croissants est de plus en plus sollicitée. Depuis le premier jour, les concepteurs de systèmes de communication sans fil étaient conscients du fait que la capacité et les interférences allaient certainement créer un problème dans un avenir très proche.

Le MIMO ou Multiple Input Multiple Output est une technique de transmission utilisée dans les systèmes modernes de communication. Cette méthode consiste à exploiter l'effet multi-trajets ainsi que la richesse du canal de propagation dans les cellules urbaines pour améliorer la performance du système en général. Cette amélioration peut se faire à travers la diversité spatiale (envoyer la même information sur plusieurs antennes) ou bien multiplexer les données sur des canaux parallèles pour servir un utilisateur avec plusieurs antennes (MIMO) ou plusieurs utilisateurs (Multi-user MIMO alias MU-MIMO).

Le MIMO massif (MIMO à grande échelle) est une technologie émergente pour les nouveaux systèmes de communication et de l'internet des objets, basée sur l'usage de centaines d'antennes interférant entre elles. C'est une des techniques utilisées pour la 5G. Un réseau d'antennes peut être partitionné en sous-réseaux appelés réseau de sous-réseaux. Le nombre de sous-réseaux dans la partition déterminera les degrés de liberté dans lesquels les éléments d'antenne peuvent interagir les uns avec les autres pour fournir les capacités de formation de faisceau de l'ensemble du réseau d'antennes

Les antennes intelligentes ont la capacité de réagir, automatiquement et en temps réel, aux différentes modifications du canal de propagation. Elles permettent aussi de réduire les niveaux des lobes secondaires se trouvant dans la direction de l'interférence, tout en maintenant le lobe principal dans la direction utile. Ce type de réseaux d'antennes peut modifier son diagramme de rayonnement, de façon dynamique, pour s'adapter aux différents problèmes de l'espace environnant (bruits, interférences, effets de propagation tels que les trajets multiples).

L'objectif visé de la 5G est d'avoir des systèmes d'antennes intelligentes qui permettent d'adapter l'énergie rayonnée en fonction des besoins de l'environnement. Elles sont basées sur des réseaux d'antennes avec différentes topologies (linéaire, planaire, circulaire...) et peuvent combiner, de manière dynamique, les différents signaux et optimiser les bilans de liaison. Ces antennes peuvent être orientées dans des directions privilégiées pour suivre un mobile tout au long de la communication. Ceci permet de limiter l'interférence créée par les signaux émis vers ce mobile et réduire les niveaux des signaux brouilleurs émis par d'autres mobiles.

Ce chapitre abordera brièvement cette technologie.

III-2) Les antennes réseaux :

Quelle que soit la complexité d'une antenne isolée, son diagramme de rayonnement reste statique et fixe. Pour obtenir un diagramme de rayonnement dynamique ou variable, il faut utiliser un groupement d'antennes appelé réseau. Une combinaison optimale de l'un des paramètres de ce réseau permet d'obtenir un diagramme de rayonnement optimisé, avec les caractéristiques exigées par le concepteur (des niveaux de lobes secondaires très bas, la directivité recherchée, une ouverture à mi-puissance très étroite et un lobe principal de forme spécifique).

Un réseau d'antennes est un système rayonnant, qui se compose de radiateurs ou d'éléments individuels. Chacun de ces radiateurs, tout en fonctionnant, possède son propre champ d'induction. Les éléments sont placés si près que chacun se trouve dans le champ d'induction du voisin. Par conséquent, le diagramme de rayonnement produit par eux serait la somme vectorielle des champs produits par les différentes antennes élémentaires.

Soit un réseau constitué de N sources élémentaires (figure III.1).

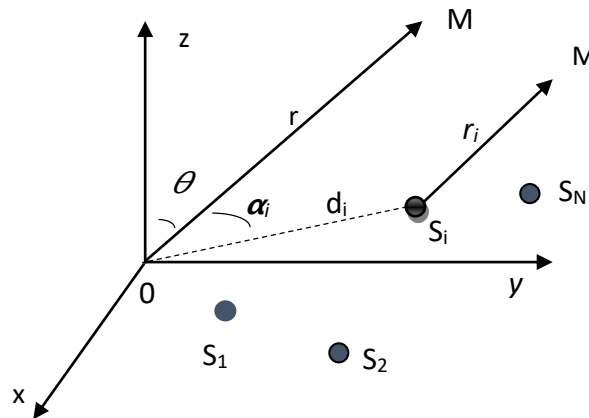


Figure III-1 : Réseau de N sources élémentaires

En un point éloigné M, une source i rayonne le champ :

$$E_i(M) = K f_i(\theta_i) A_i e^{j\varphi_i} \frac{e^{jk|S_i M|}}{|S_i M|}$$

Avec :

- S_i son centre de phase
- $A_i e^{j\varphi_i}$ son alimentation complexe
- $f_i(\theta_i)$ sa fonction caractéristique
- et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ le nombre d'onde

Le champ total rayonné pour le réseau de sources est la somme de tous ces champs.

Approximation champ lointain :

- sur le terme d'amplitude : $S_i M \approx OM$
- sur le terme de phase $S_i M \approx OM - d_i \cos \alpha_i$
- $d_i = OS_i$, $d_i \cos \alpha_i$: différence de marche

$$E_i(M) = \frac{K}{|OM|} \exp(-jk|OM|) [f_i(\theta_i) A_i \exp(j(\varphi_i + kd_i \cos \alpha_i))]$$

Le champ total rayonné sera :

$$E(M) = \frac{K}{|OM|} \exp(-jk|OM|) \sum_i f_i(\theta_i) A_i \exp(j\psi_i)$$

Avec : $\psi_i = \varphi_i + kd_i \cos \alpha_i$

Le diagramme de rayonnement d'un tel réseau de sources est donc :

$$\sum_i A_i f_i(\vartheta_i) \exp(j\psi_i)$$

Le réseau d'antennes produit un faisceau. On peut agir sur ce faisceau en modifiant la géométrie (linéaire, circulaire, sphérique, etc.) et également en modifiant certains autres paramètres, à savoir l'espacement inter-élément, l'amplitude d'excitation et la phase d'excitation de chaque élément individuel. Dans la plupart des cas, la communication sans fil nécessite une antenne

plus directive à gain élevé. Le réseau d'antennes permet un gain élevé et une diversité spatiale plus directive

III-3) Réseau d'antennes à éléments multiples :

III-3-1) Les antennes MIMO :

La technologie MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) semble dépasser la limite de débit de données rencontrée par les systèmes de communication sans fil classiques à entrée unique-sortie (SISO). Dans MIMO, une augmentation significative du débit de données est obtenue en utilisant plusieurs flux de données envoyés et reçus par plusieurs éléments d'antenne aux extrémités de l'émetteur et du récepteur, et c'est pourquoi les systèmes sans fil de quatrième génération (4G) prennent en charge plus d'applications multimédias et de vidéos en temps réel [36]. Par rapport aux générations plus anciennes. La conception des systèmes d'antennes MIMO n'est pas une tâche insignifiante et nécessite des pratiques de conception minutieuses. Plusieurs mesures de performance ont été identifiées pour les systèmes d'antennes MIMO qui doivent être évalués en plus des systèmes d'antennes à élément unique conventionnels.

La relation entre le signal reçu et transmis sur différentes antennes est exprimée par un système d'équations linéaires. Dans ce système, le vecteur des signaux reçus est exprimé comme un produit de la matrice de canal (H) et du signal émis.

La matrice de transmission H contient la réponse impulsionnelle du canal (N, M), qui lie les N antennes d'émission aux M antennes de réception.

Le Rang de la matrice H définit le nombre de flux de données indépendants pouvant être transmis simultanément.

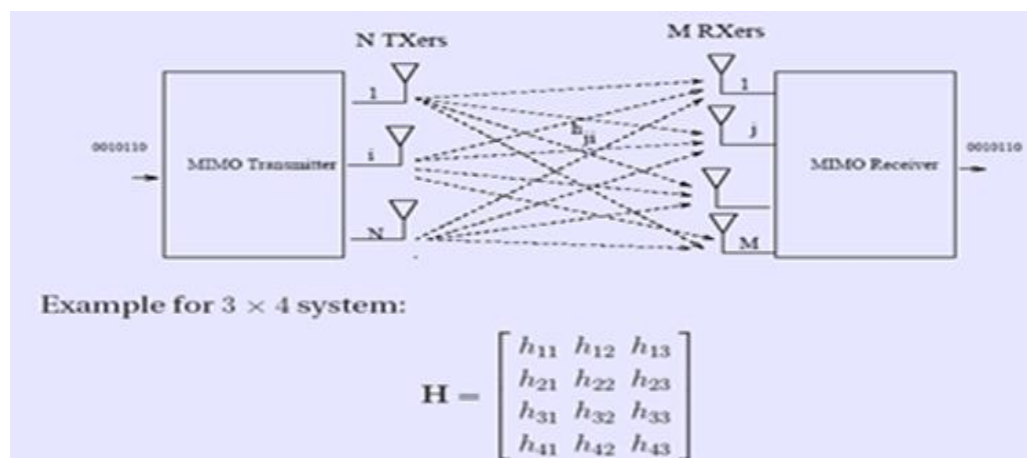


Figure III -2 : Configuration MIMO. Matrice de transmission

Remarque :

Il est également très important de décider du nombre d'antennes dans la conception de l'antenne conforme MIMO. Le couplage d'antenne a un impact significatif sur le diagramme de rayonnement. Lors de l'utilisation de plusieurs antennes, le couplage croisé entre les antennes doit être discuté et le couplage doit être minimisé. Le principal facteur qui affecte le couplage est la distance entre les antennes. Plus la distance entre les antennes est proche, plus le couplage est important. Par conséquent, nous devons trouver l'espacement d'antenne approprié pour répondre aux exigences de performance du couplage d'antenne.

III-3-2) Du MIMO au Massive MIMO :

Le MIMO massif (MIMO à grande échelle) est une technologie émergente pour les nouveaux systèmes de communication et de l'internet des objets, basée sur l'usage de centaines d'antennes interférant entre elles. C'est une des techniques candidates pour la 5G et pour succéder à la 4G LTE. Parmi les évolutions, on peut citer une connectivité élevée et des équipements à faible coût pour s'adapter à la croissance du nombre de périphériques, la capacité de s'adapter aux environnements de haute densité, la mobilité afin de s'assurer que l'expérience suit l'utilisateur, une latence de transmission réduite pour la réalité augmentée et l'internet tactile, l'efficacité énergétique satisfaisant aux directives de communications vertes et bien sûr le débit et la sécurité.

Cette technologie consiste à équiper une station de base avec un nombre élevé M d'antennes (M antennes réseaux) pour servir un nombre d'utilisateurs K sous la supposition $M \gg K$. Les K utilisateurs peuvent avoir plusieurs antennes dans leurs terminaux. Le modèle d'un système Massive MIMO est proche de celui du Multi-user MIMO déjà utilisé en LTE-Advanced.

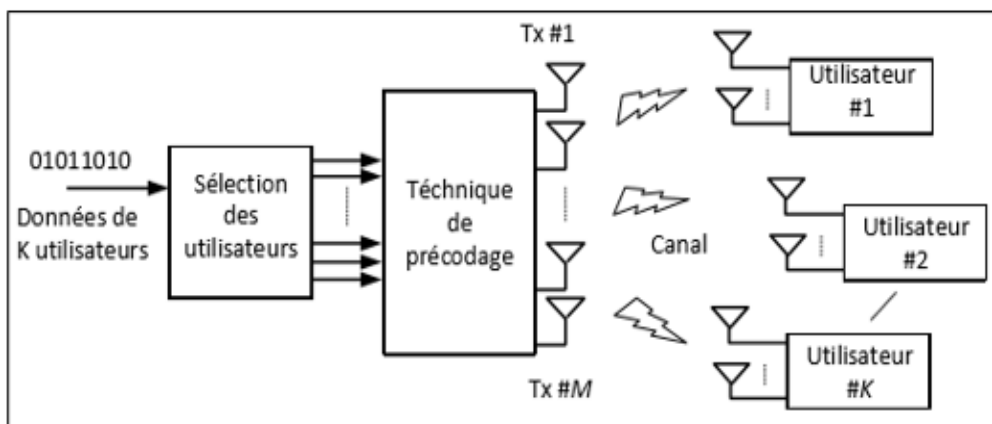


Figure III-3 : modèle mimo massif - M antennes - K utilisateurs

Le principe est l'exploitation de la dimension spatiale, créant ainsi de nombreux degrés de liberté et stimulant le principe de la transmission simultanée par multiplexage spatial. Servir différents utilisateurs dans la même ressource temps-fréquence peut être considéré comme un élément-clé pour la cinquième génération de réseaux mobiles en raison de l'épuisement des fréquences disponibles dans le spectre de fréquence et pour répondre aux contraintes d'efficacité spectrale.

Il existe de nombreuses façons d'utiliser le réseau d'antennes à éléments multiples. Un réseau d'antennes peut être partitionné en sous-réseaux appelés réseau de sous-réseaux. Le nombre de sous-réseaux dans la partition déterminera les degrés de liberté dans lesquels les éléments d'antenne peuvent interagir les uns avec les autres pour fournir les capacités de formation de faisceau de l'ensemble du réseau d'antennes.

En pratique, la conception réelle du réseau d'antennes dépend des capacités de formation de faisceau requises, ainsi que de la complexité totale d'un système et des considérations budgétaires influencées par des facteurs tels que la direction et le coût.

Le nombre d'antennes de sous-réseau détermine le degré de liberté. De cette manière, la partition détermine les capacités de formation de faisceau du réseau d'antennes, couplées à la complexité totale et à l'orientation par rapport au coût

Les principaux avantages du MIMO massif sont :

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suit [37][36] :

- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Augmentation du débit de données
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.
- Renforcement des canaux



Figure III-4 : les principaux avantages de MIMO massif

III-3-3) Le beamforming et les antennes massive MIMO :

La formation de faisceaux est la capacité d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes à un scénario particulier.

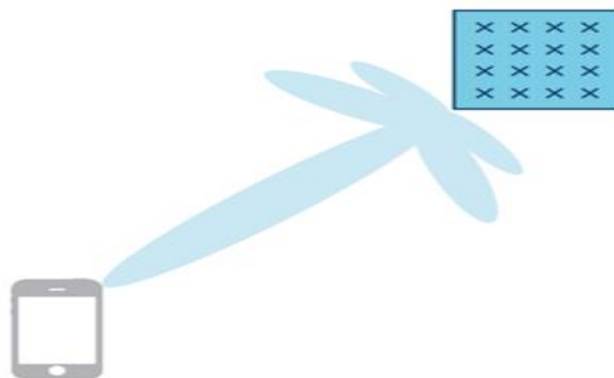


Figure III-5 : Beamforming et formation de faisceau

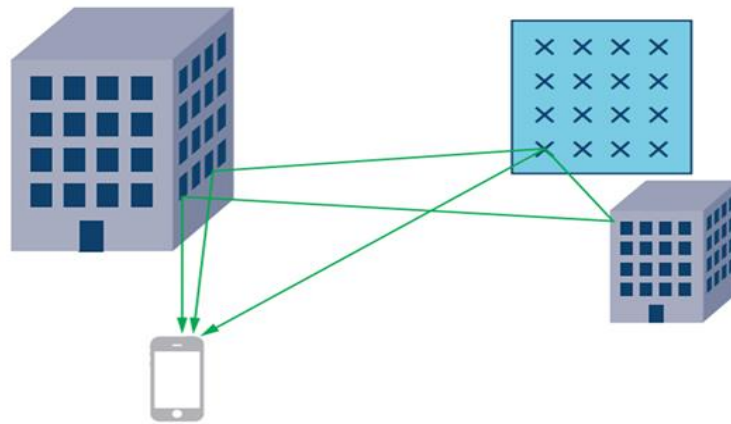


Figure III-6 : Environnement multi-trajets entre le réseau d'antennes et l'utilisateur

Le MIMO massif peut être considéré comme une forme de formation de faisceaux au sens plus général du terme, mais est assez éloigné de la forme traditionnelle. Massive fait simplement référence au grand nombre d'antennes dans le réseau d'antennes de la station de base.

MIMO fait référence au fait que plusieurs utilisateurs spatialement séparés sont pris en charge par le réseau d'antennes dans la même ressource de temps et de fréquence. Massive MIMO reconnaît également que dans les systèmes du monde réel, les données transmises entre une antenne et un terminal utilisateur — et vice versa - subit un filtrage de l'environnement environnant. Le signal peut être réfléchi par les bâtiments et autres obstacles, et ces réflexions auront un retard, une atténuation et une direction d'arrivée associés, comme illustré à la figure III-6 se peut même qu'il n'y ait pas de ligne de visée directe entre l'antenne et le terminal utilisateur. Il s'avère que ces voies de transmission non directes peuvent être exploitées comme une puissance pour de bon.

III-4) Antennes intelligentes :

A mesure que la demande en communications mobiles continue à croître, le besoin d'une meilleure couverture, d'une grande capacité et d'une transmission de haute qualité ne cesse d'augmenter. Afin d'atteindre ces objectifs, les systèmes à réseaux d'antennes adaptatives ou intelligentes (smart antennas) sont introduits dans le domaine de la communication mobile.

En général, une antenne intelligente est constituée d'un réseau de M antennes élémentaires; les signaux reçus sont pondérés et combinés en utilisant une technique d'adaptation afin de contrôler et d'améliorer la réception et/ou la transmission [37][38]. Le domaine d'antennes intelligentes est interdisciplinaire, incluant les outils électromagnétiques, les microondes, la conception d'antennes et le traitement de signal. Autrement dit, l'électromagnétisme est primordiale pour développer les communications sans fil et le traitement numérique de signal est primordial pour les rendre intelligentes. L'intérêt de ces systèmes est leur capacité à réagir automatiquement, en temps réel, à des variations du canal de propagation.

Deux catégories de systèmes d'antennes intelligentes existent :

Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux

Les systèmes d'antennes adaptatives.

III-4-1) Systèmes à réseau d'antennes à commutation de faisceaux

Les systèmes d'antennes à commutation de faisceaux divisent l'espace angulaire en micro secteurs chacun contenant un diagramme de rayonnement prédéterminé. Lorsque l'utilisateur entre dans la zone de couverture du système, l'antenne détermine dans quel secteur se situe

l'utilisateur et commute sur le faisceau correspondant.

Dans un environnement dynamique ou l'utilisateur bouge, le système commute Continuellement d'un lobe à l'autre gardant le niveau maximal du signal reçu.

Une solution qui génère ce type de système à plusieurs lobes est la matrice de Butler [38]. C'est une technique analogique qui permet la génération de plusieurs lobes Orthogonaux prédéfinis par l'utilisation de circuits micro-ondes simples.

Les systèmes à commutation de faisceau offrent plusieurs avantages [39] :

- Faible complexité et faible coût. Puisque ces systèmes exigent uniquement un réseau d'alimentation de faisceaux (beamforming network), un commutateur RF, et une simple commande logique qui sont relativement moins chères et faciles à mettre en application.
- Interaction modérée avec des récepteurs de station de base. Dans la pratique, les systèmes à faisceaux commutés peuvent simplement remplacer les antennes sectorielles conventionnelles sans exiger des modifications significatives sur l'interface radio de l'antenne de station de base ou sur les algorithmes de bande de base mis en application au récepteur.
- Une couverture étendue.
- Formation simultanée de multiples faisceaux

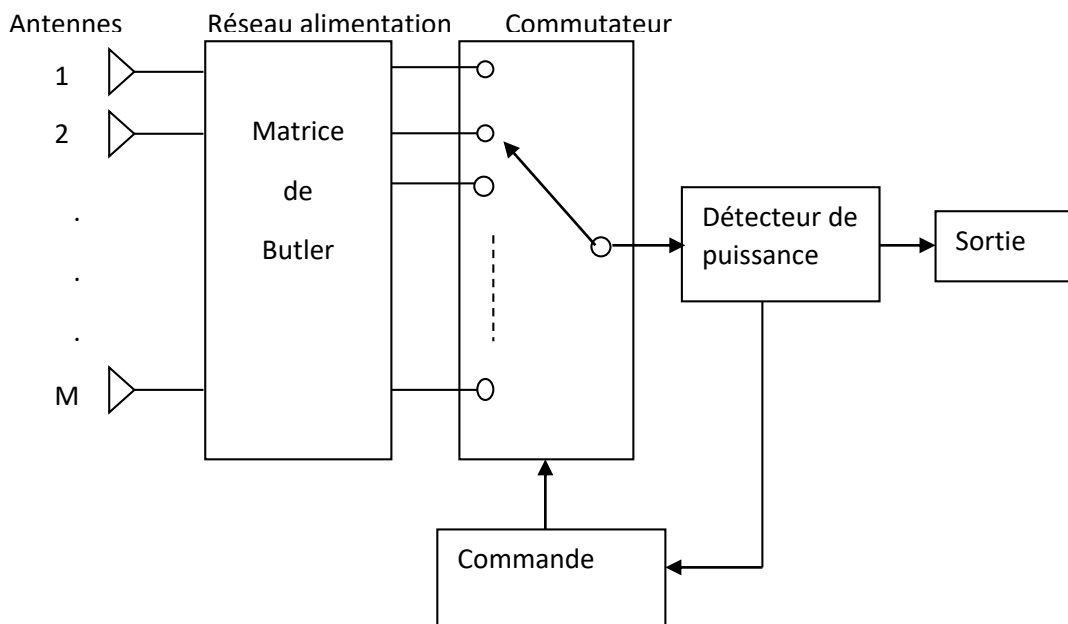


Figure III-7: Antenne réseau à commutation de faisceau

Dans la figure III-7 M lobes orthogonaux sont générés par la matrice de Butler $M \times M$. Le Circuit de déphasage possède M ports d'entrées et M ports de sorties. Chaque port D'entrée correspond à un patron prédéfini avec un lobe principal. Dans un environnement Dynamique, le système choisit et commute continuellement vers le lobe approprié.

III-4-2) Les systèmes d'antennes adaptatives

Les systèmes d'antennes adaptatives représentent le système le plus avancé des systèmes d'antennes intelligents. L'antenne adaptative adapte son diagramme de rayonnement en fonction de la position des utilisateurs et des signaux parasites ou des signaux brouilleurs afin

d'optimiser la liaison. Grâce à la capacité de poursuite précise et le rejet d'interférence, plusieurs utilisateurs peuvent se partager le même canal fréquentiel à l'intérieur de la même cellule.

Le réseau adaptatif peut être défini comme étant un réseau d'antennes relié à un Processeur de traitement de signal qui peut adapter le patron de rayonnement de L'antenne en privilégiant une direction désirée et en atténuant les directions des Interférences [27].

La figure II-8 montre le principe de fonctionnement d'un réseau adaptatif. Les Algorithmes sont optimisés pour s'adapter à des changements dynamiques du signal. Les Poids complexes sont ensuite ajustés pour obtenir le patron de rayonnement optimal dont Le lobe principal est orienté vers l'utilisateur désiré et les nuls du patron de rayonnement Sont placés dans les directions des interférences.

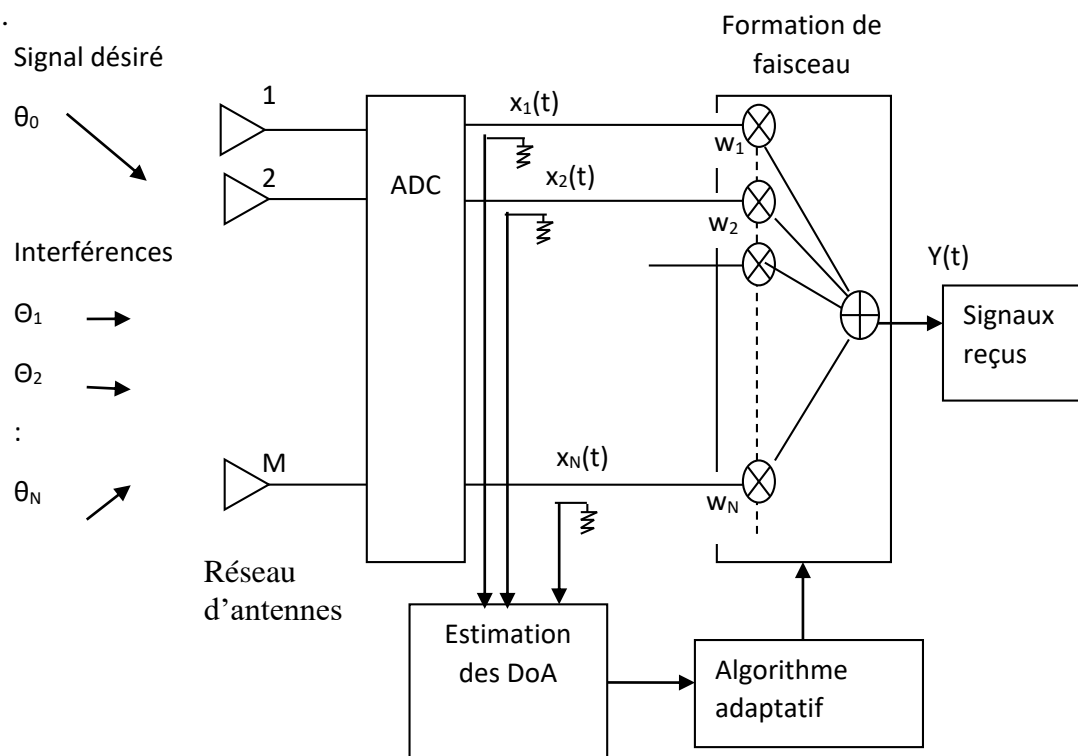


Figure III-8: Structure et principe du système adaptatif

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les réseaux d'antennes à élément multiples utilisés dans les systèmes de téléphonie mobile de dernières générations. Nous avons détaillé les structures et les types de ces antennes en faisant ressortir leurs avantages. Nous avons, également, fait une mise au point sur les différentes méthodes actuelles de traitement utilisées, en insistant sur la technique adoptée qui est la technique de formation des lobes (de faisceaux) et l'annulation des interférences. Nous avons montré comment l'application du concept d'antennes intelligentes à un réseau de communication permet, d'une part, d'optimiser le diagramme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace et d'une autre part, d'annuler certaines directions en éliminant les émissions parasites qui pourraient perturber la communication ou diminuer le débit de transmission de données.

Chapitre IV : Synthèse de faisceau.
Beamforming

IV-1) Introduction :

La formation de faisceaux est une technique clé qui est utilisée pour améliorer le rapport signal sur bruit des signaux reçus, éliminer les sources d'interférences indésirables et concentrer les signaux transmis sur un emplacement spécifique. La formation de faisceaux est au cœur des systèmes de communication sans fil modernes tels que la 5G, LTE et WLAN, et est utilisée dans les réseaux de capteurs [41].

Le "beamforming" est une technique utilisée par les réseaux d'antennes pour modifier la directivité et la sensibilité du patron de rayonnement. Le "beamformer" augmente le gain dans la direction désirée et place des nuls dans la direction des interférences. De ce point de vue, on peut considérer que le "beamformer" est un filtre spatial [40]. Comme dans le cas des filtres conventionnels, il existe deux façons pour réaliser le "beamformer" : numérique et analogique.

Le "beamformer" numérique est constitué par un réseau d'antennes où chaque élément est directement relié à un convertisseur analogique à numérique. En réception, un poids complexe affecté à chaque antenne est appliqué en numérique par l'unité de bande de base. Les algorithmes du "beamformer" adaptent le patron de rayonnement en optimisant ces poids.

Le "beamformer" analogique par contre utilise des déphaseurs analogiques pour générer le déphasage nécessaire entre les éléments d'antenne afin d'adapter le patron de rayonnement. Les signaux déphasés sont combinés en une seule sortie analogique qui est convertie par un seul convertisseur analogique à numérique. Une façon de réaliser ce "beamformer" est la matrice de Butler qui permet la conception de l'antenne à faisceau commutable qui a un nombre prédéfini de faisceaux.

L'avantage principale des réseaux d'antennes par rapport à une antenne simple est leurs capacités de balayage électronique, c'est-à-dire que le lobe principal peut être orienté vers n'importe quelle direction en changeant la phase du courant d'excitation de chaque élément de réseau (antennes à réseau phasé)

Dans la première étape, une étude sur les réseaux linéaires d'antennes équi-amplitudes et à phase progressive est présentée. Des codes Matlab sont écrits et exécutés. Les résultats et la représentation des diagrammes de rayonnement sont donnés pour un alignement horizontal, vertical et pour une disposition 2D des antennes. La méthode de Dolph Tchebychev est appliquée pour réduire le niveau des lobes secondaires

Ensuite la synthèse de lobe pour les antennes intelligentes est abordée. Les deux techniques numérique et analogique de formation de faisceau sont traitées.

IV-2) Synthèse des réseaux directifs

IV-2-1) Alignement de sources équidistantes avec phase progressive :

IV-2-1-1) Notions générales :

Soit N sources identiques alignées, équidistantes et dont les phases varient de φ d'une source à la suivante (figure IV.1).

$$f_i(\vartheta_i) = f(\vartheta) \quad , \quad A_i = A_0$$

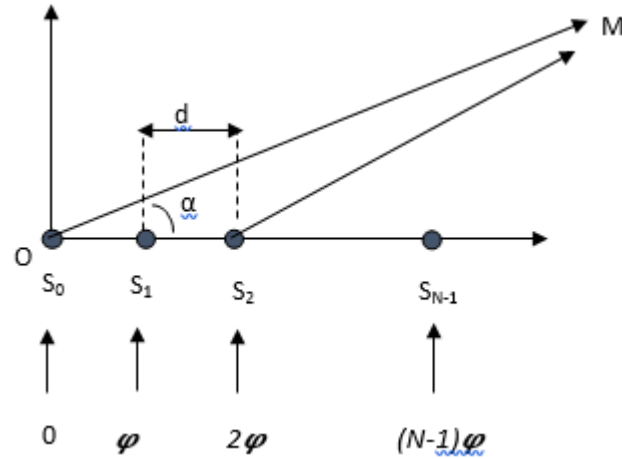


Figure IV-1: Réseau linéaire de sources équidistantes avec phase progressive

Le champ total rayonné pour le réseau :

$$E(M) = K \frac{e^{-jkr}}{r} A_0 f(\theta) \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\psi_i}$$

K : est un facteur d'homogénéité

On pose $E_0 = K \frac{e^{-jkr}}{r} A_0$

$$E(M) = E_0 f(\theta) \sum_{i=0}^{N-1} e^{j\psi_i} = E_0 f(\theta) \frac{1 - e^{jN\psi}}{1 - e^{j\psi}}$$

$$\psi_i = \varphi_i + kd_i \cos \alpha_i = i(\varphi + kd \cos \alpha) = i\psi$$

$$\psi = \varphi + kd \cos \alpha$$

$$|E| = E_0 f(\theta) \left| \frac{\sin\left(N \frac{\psi}{2}\right)}{\sin \frac{\psi}{2}} \right|$$

La valeur max de cette fonction est $N E_0$

La fonction caractéristique de rayonnement est : $F_{Antenneréseau} = f(\theta) \cdot F(\alpha)$

Avec : $F(\alpha) = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin N \frac{\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \right|$ le facteur de réseau

Lobes de réseau :

$F(\alpha)$ est max si $\psi = 2m\pi$ avec : $m = 0, 1, 2, \dots$

$$\cos \alpha_{lobe} = -\frac{\lambda \varphi}{2\pi d} + m \frac{\lambda}{d}$$

Pour que l'énergie rayonnée ne se disperse pas inutilement, on veut une seule direction de rayonnement max obtenue pour $m=0$.

1) $m=0$ $\cos \alpha_0 = -\frac{\lambda \varphi}{2\pi d}$: **lobe principale**

α_0 Correspond à une direction de rayonnement et $|\cos \alpha_0| < 1 \Rightarrow \frac{\lambda |\varphi|}{2\pi d} < 1$

2) $m=\pm 1$: **lobes de périodicité**

$$\cos \alpha_{lobepériodicité} = -\frac{\lambda \varphi}{2\pi d} \pm \frac{\lambda}{d} = \cos \alpha_0 \pm \frac{\lambda}{d}$$

Pour que α ainsi défini ne corresponde pas à une direction de rayonnement il faut

$$|\cos \alpha_{lobe}| > 1 \Rightarrow \cos \alpha_0 \pm \frac{\lambda}{d} > 1 \Rightarrow d < \frac{\lambda}{1 + |\cos \alpha_0|}$$

Pour $d < \lambda/2$ aucune ambiguïté de rayonnement n'existe.

Gain de réseau : $G = \frac{P_{max}}{P_a/4\pi}$

P_a : la puissance d'alimentation des sources $P_a = K \sum_i (A_i)^2$

P_{max} : puissance max rayonnée par unité d'angle solide, correspond au cas où tous les champs élémentaires rayonnés sont en phase.

$$P_{max} = \frac{1}{4\pi} K (\sum_i A_i)^2 \quad \text{et} \quad G = \frac{(\sum A_i)^2}{\sum A_i^2}$$

Si les sources sont équi-amplitudes $A_i = A_0$, le gain de réseau $G=N$ et le gain de l'antenne réseau $G_{antenne} = NG_1$

G_1 gain de chacune des sources ; formule valable pour des sources non couplées

Lobes secondaires :

$$F(\alpha) = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin N \frac{\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \right|$$

Les zéros de rayonnement sont obtenus pour

$$\sin N \frac{\psi}{2} = 0 \Rightarrow N \frac{\psi}{2} = m\pi \quad \text{Avec } m=0,1,2,\dots,N-1$$

$N-1$ zéros de rayonnement. Le premier zéro pour $m=1 \Rightarrow \cos \alpha_1 = -\frac{\lambda\varphi}{2\pi d} \pm \frac{\lambda}{Nd}$

1^{er} lobe secondaire :

Posons $x = N \frac{\psi}{2} \Rightarrow \frac{\psi}{2} = \frac{x}{N}$: angle petit $\Rightarrow \sin \frac{x}{N} \sim \frac{x}{N} \Rightarrow F(\alpha) = \left| \frac{\sin x}{x} \right|$

Le première lobe secondaire donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\alpha)}{\partial x} = 0 &\Rightarrow \text{tg}x = x \Rightarrow x_2 = \pm 4,5 \text{ rad} \\ \Rightarrow \pm \frac{4,5}{N} &= \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi d}{\lambda} \cos \alpha_2 \Rightarrow \cos \alpha_2 = -\frac{\lambda\varphi}{2\pi d} \pm \frac{4,5}{N\pi d} \end{aligned}$$

Le niveau du première lobe secondaire est donné par :

$$\left| \frac{\sin x_2}{x_2} \right| = \left| \frac{\sin 4,5}{4,5} \right| = 0,217 \Rightarrow -13.26 \text{dB}$$

IV-2-1-2) alignement selon Oz de Nz sources isotropes (code Matlab reseau0z.m [Annexe 1]) :

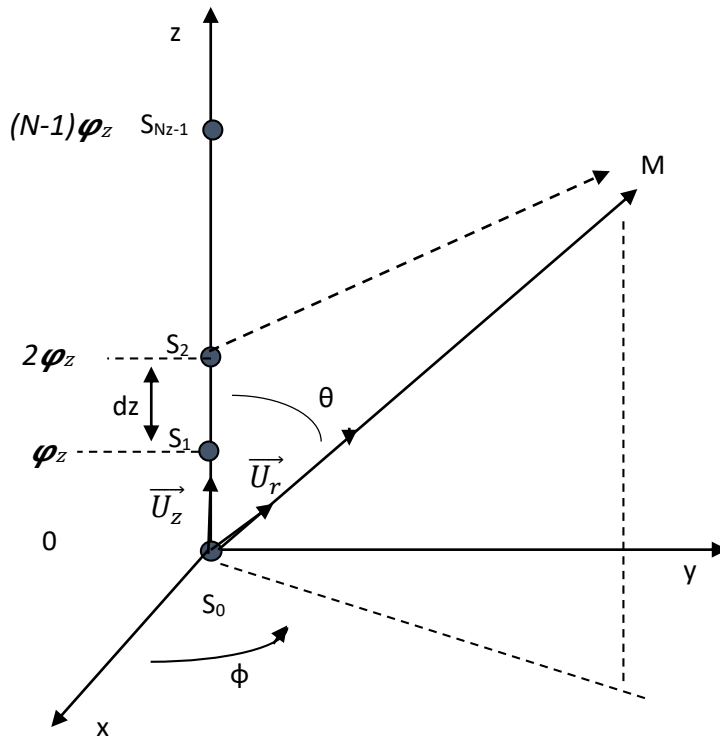


Figure IV-2: Réseau linéaire selon Oz

Le champ total produit en zone lointaine par ce réseau en 1 point M de l'espace est de la forme :

$$E = N_z v_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1}{N_z} \frac{\sin\left(N_z \frac{\psi_z}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_z}{2}\right)} = N_z E_0 F_z(\theta, \phi)$$

Avec :

$E_0 = v_0 \frac{e^{-jkr}}{r}$: le champ d'une seule source.

$F_z(\theta, \phi) = \left| \frac{1}{N_z} \frac{\sin\left(N_z \frac{\psi_z}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_z}{2}\right)} \right|$: facteur de réseau selon oz

Où

$$\psi_z = -\varphi_z + kd_z \vec{u}_z \cdot \vec{u}_r = -\varphi_z + \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \theta$$

φ_z est le déphasage de l'alimentation entre deux sources consécutives

d_z l'espacement entre sources

\vec{u}_z et \vec{u}_r sont les vecteurs unitaires selon Oz et OM respectivement

Un code Matlab `reseauOz.m` (voir annexe 1) est écrit. Il permet de synthétiser le faisceau produit par cet alignement de sources selon Oz.

Pour les données suivantes :

Nombre de sources $N_z = 8$

Orientation du lobe principale désirée : $\theta_0 = 93^\circ$

Espacement $dz = 0,7 \lambda$

Le programme calcule d'abord le déphasage puis le facteur de réseau pour $0 < \theta < 180^\circ$

Les figures suivantes présentent les diagrammes obtenus :

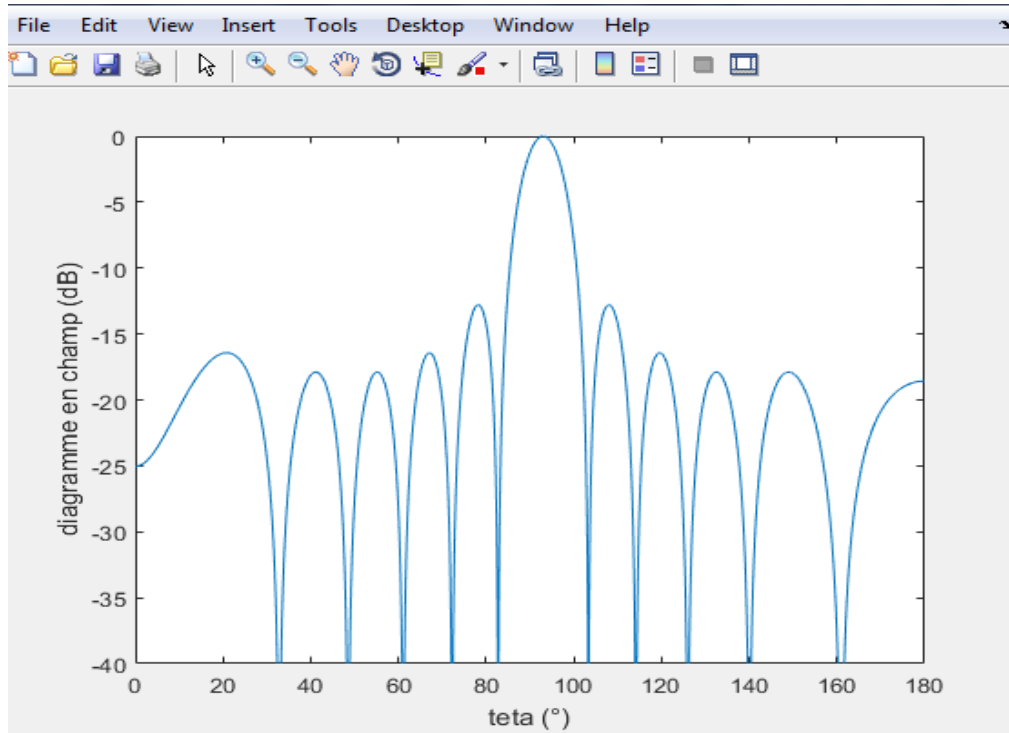


Figure IV-3: Diagramme en champ en dB

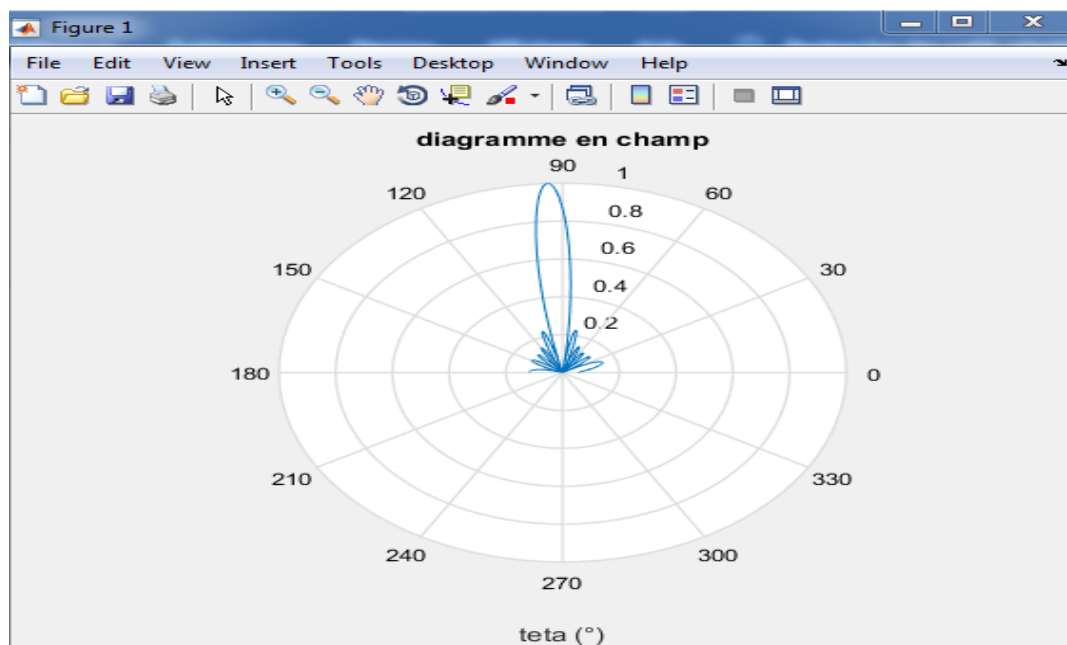


Figure IV-4: Représentation du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires

Les figures IV-3 et IV-4 montrent qu'il a un seul lobe donc pas d'ambiguïté ; la règle $(d < \frac{\lambda}{1+|\cos a_0|})$ n'est respectée. Il est orienté selon la direction souhaité 93°. Le niveau des lobes secondaires est de 13 dB inférieur au lobe principal ; en accord avec la théorie.

Les figures suivantes IV-3 et IV-4 montrent le cas d'un nombre d'antennes : n=16

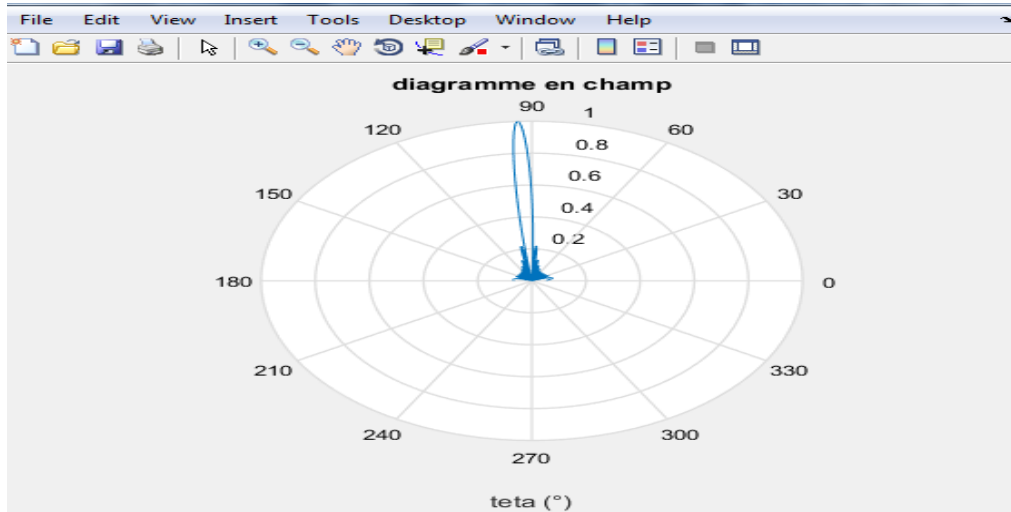


Figure IV-5 : Représentation du diagramme de rayonnement en coordonnées polaires 16 antennes

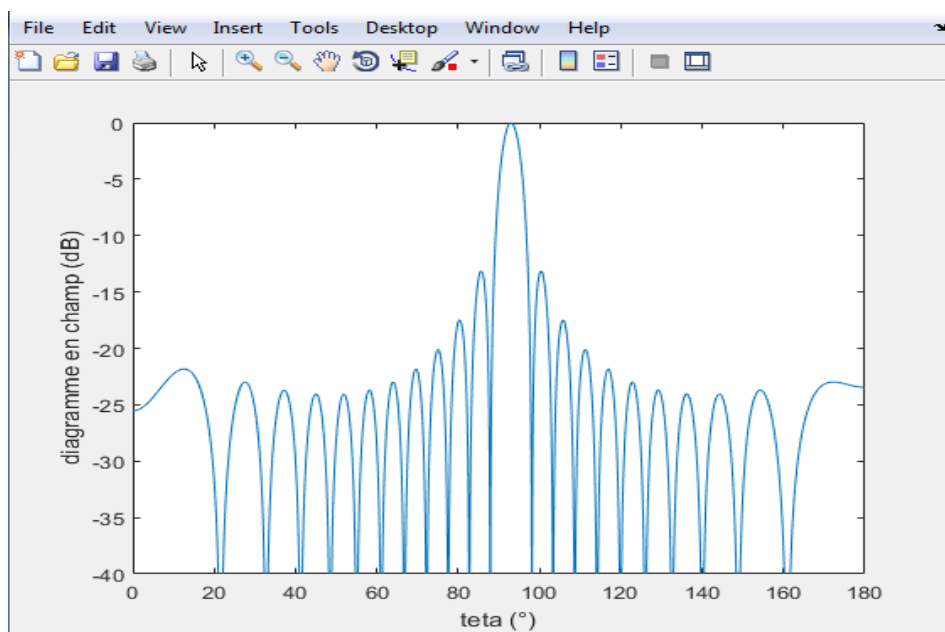


Figure IV-6: Diagramme en champ en dB 16 antennes

La largeur du lobe principal est plus faible ; réseau est donc plus directif. Le niveau du 1^{er} lobe secondaire reste inchangé (-13 dB).

Conclusion :

On peut enfin envisager la possibilité d'augmenter le nombre des sources (antennes) déjà très intéressant. En effet, il a été remarqué lors de l'augmentation de ce nombre, les diagrammes de

rayonnement sont caractérisés par un lobe principal plus directif. On peut penser, lorsqu'on désire établir une relation directionnelle entre l'émetteur et le récepteur, il faut que la direction de rayonnement maximal coïncide avec cette direction. Par conséquent, la puissance rayonnée hors de cette direction est perdue ; elle peut même perturber des liaisons situées dans d'autres directions.

Il est donc nécessaire d'affiner le lobe de rayonnement principal par augmentations de nombre des antennes par exemple dans le cas de réseau planaire et réduire au minimum le niveau des lobes de rayonnement secondaires.

IV-2-1-3) alignement selon Oy de Ny sources isotropes (code Matlab reseau0y.m [Annexe 2]) :

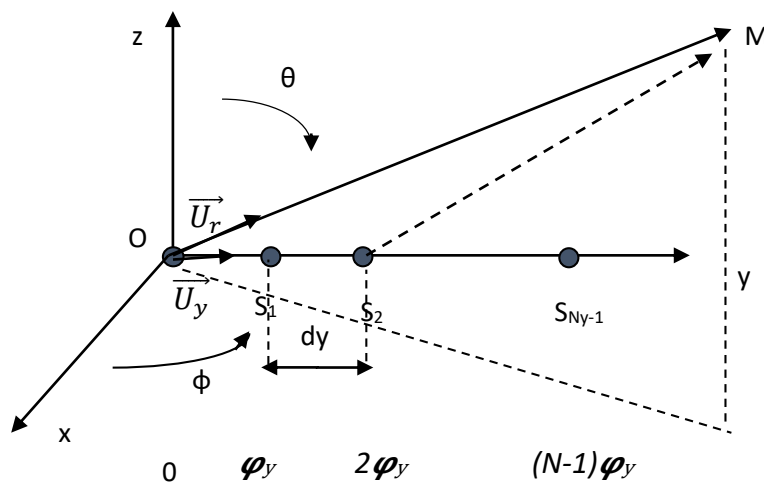


Figure IV-7: Réseau linéaire Oy

Le champ total produit en zone lointaine en 1 point M:

$$E = v_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1}{N_y} \frac{\sin\left(N_y \frac{\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} = N_y E_0 F_y(\theta, \phi)$$

Facteur de réseau selon oy : $F_y(\theta, \phi) = \left| \frac{1}{N_y} \frac{\sin\left(N_y \frac{\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right|$

Avec $\psi_y = -\phi_y + kd_y \vec{U}_y \cdot \vec{U}_r = -\phi_y + \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \theta \sin \phi$

ϕ_y est le déphasage de l'alimentation entre deux sources consécutives

d_y l'espacement entre sources selon Oy

\vec{u}_y et \vec{u}_r sont les vecteurs unitaires selon Oy et OM respectivement

Un code Matlab reseau0y.m (voir annexe 2) est écrit. Il permet de synthétiser le faisceau produit par cet alignement de sources selon Oy dans le plan horizontal (0xOy), $\theta=90^\circ$.

Pour les données suivantes :

Nombre de sources $N_y = 8$

Orientation du lobe principale désirée : $\phi = 31^\circ$

Espacement $dz = 0,5 \lambda$

Le programme calcule d'abord le déphasage ϕ_y puis le facteur de réseau pour $-90^\circ < \theta < +90^\circ$

Les figures suivantes présentent les diagrammes obtenus :

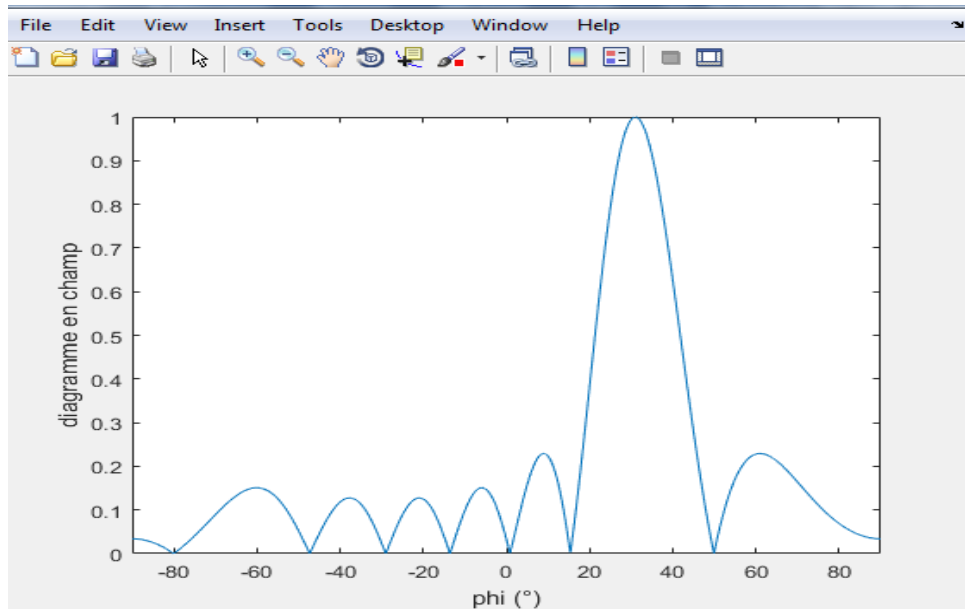


Figure IV-8: Diagramme en champ du réseau linéaire selon Oy

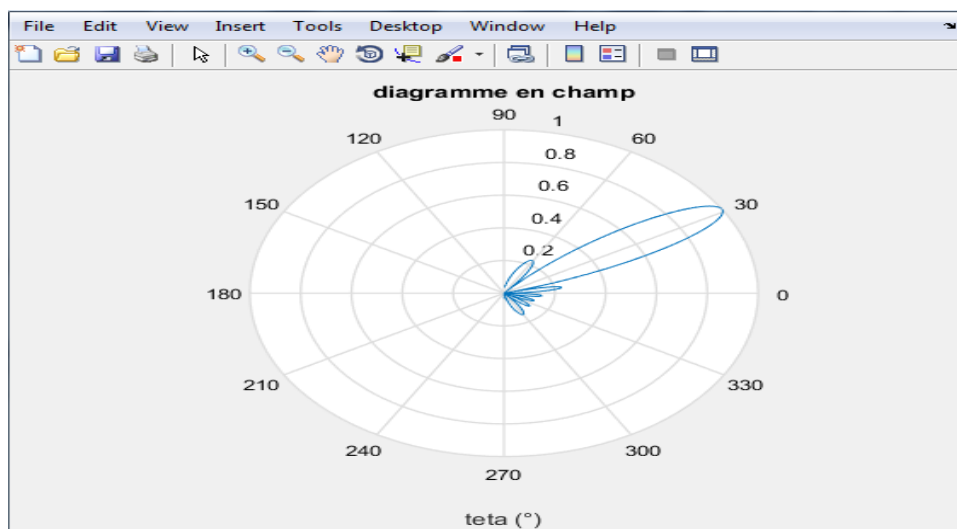


Figure IV-9 : Diagramme en champ en coordonnées polaires du réseau linéaire selon Oy

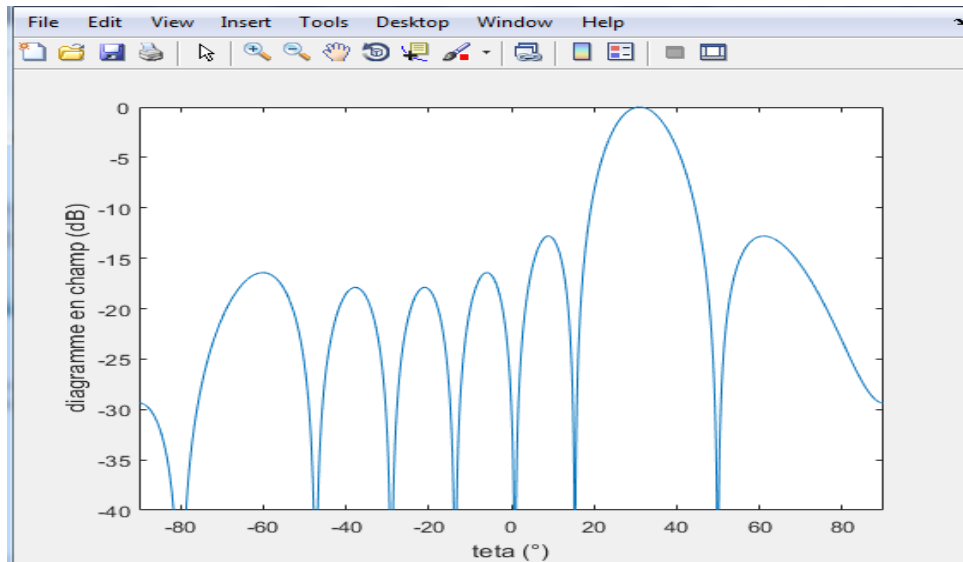


Figure IV-10: Diagramme en champ en coordonnées polaires du réseau linéaire selon Oy

: Diagramme en champ en dB du réseau linéaire selon Oy

Les figures IV-8, IV-9 et IV-10 montrent qu'il a un seul lobe donc pas d'ambiguïté ; la règle ($d < \frac{\lambda}{1+|\cos a_0|}$) est respectée. Il est orienté selon la direction souhaité 31° . Le nombre de zéros de transmission est égal $Ny - 1 = 7$ comme le prévoit la théorie. Le niveau des lobes secondaires est de 13 dB inférieur au lobe principal en accord avec la théorie.

IV-2-1-4) Réseau 2D dans le plan $OyOz$ de $Ny * Nz$ sources isotropes (code Matlab `reseau2D.m` [Annexe 3]) :

La figure IV-11 représente le réseau 2D étudié. Il se trouve à une distance h du sol

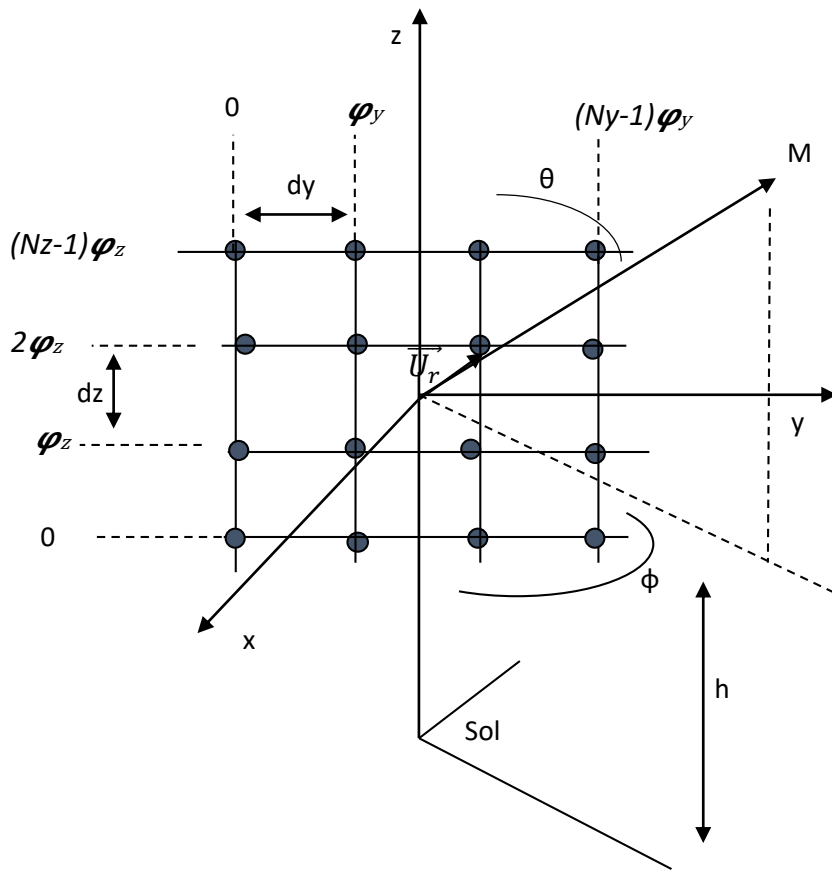


Figure IV-11 : Le Réseau 2D bilinéaire étudié.

Le champ total produit par ce réseau est de la forme

$$E = N_y \cdot N_z \times \text{Le champ d'une seule source} \times F_z(\theta, \phi) \times F_y(\theta, \phi)$$

$$E = N_y N_z v_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1}{N_z} \frac{\sin\left(N_z \frac{\psi_z}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_z}{2}\right)} \times \frac{1}{N_y} \frac{\sin\left(N_y \frac{\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)}$$

$$\psi_y = -\varphi_y + kd_y(\vec{U}_y \cdot \vec{U}_r) = -\varphi_y + kd_y \sin \theta \sin \phi$$

$$\psi_z = -\varphi_z + kd_z(\vec{U}_z \cdot \vec{U}_r) = -\varphi_z + \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \theta$$

La puissance reçue P_R par une antenne isotrope à une distance r de ce réseau est donnée par la

formule de Friis modifiée

$$P_R = P_e N_y N_z \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left| \frac{1}{N_z} \frac{\sin\left(N_z \frac{\psi_z}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_z}{2}\right)} \right|^2 \left| \frac{1}{N_y} \frac{\sin\left(N_y \frac{\psi_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right|^2$$

Au sol, $r = \sqrt{h^2 + x^2 + y^2}$ et $\cos \theta = -\frac{h}{r}$, $\sin \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{h}{r}\right)^2}$

Et $\sin \phi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$

Les paramètres sont les suivants :

- $f = 3500$ MHz
- 8×8 éléments avec espacement horizontal et vertical $dy = 0.5 \lambda = 42$ mm, $dz = 0.7 \lambda = 58$ mm, respectivement
- amplitude uniforme (pleine puissance)
- déphasage progressif dans le sens horizontal et vertical pour diriger le faisceau vers (θ_0, ϕ_0) . (une situation quelque peu idéale)
- hauteur de la station de base $h = 50$ m
- portée maximale = 1000 m
- propagation en espace libre (ligne de visée)

Les déphasages appliqués pour les sources alimentant les antennes élémentaires selon y φ_y et selon z φ_z sont calculés comme suit :

$F_y(\theta, \phi)$ Max dans le plan horizontal (azimut) :

$$\psi_y = 0 = -\varphi_y + \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \phi_0 \Rightarrow \varphi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin \phi_0 = \pi \sin 31^\circ = F_z(\theta, \phi)$$

Max dans le plan vertical (élévation) :

$$\text{Si } \psi_z = 0 = -\varphi_z + \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \vartheta_0 \Rightarrow \varphi_z = \frac{2\pi}{\lambda} d_z \cos \vartheta_0 = +1.4\pi \cos 93^\circ = 13,2^\circ.$$

Un code Matlab est écrit : Reseau2D.m (voir annexe3). Il calcule la répartition de puissance normalisée au sol autour de l'antenne réseau 2D.

L'application est faite pour $h=50$ m, $N_y = N_z = 8$ et $\vartheta_0 = 93^\circ$, $\phi_0 = 31^\circ$

La figure IV-12 suivante présente cette répartition de puissance normalisée au sol :

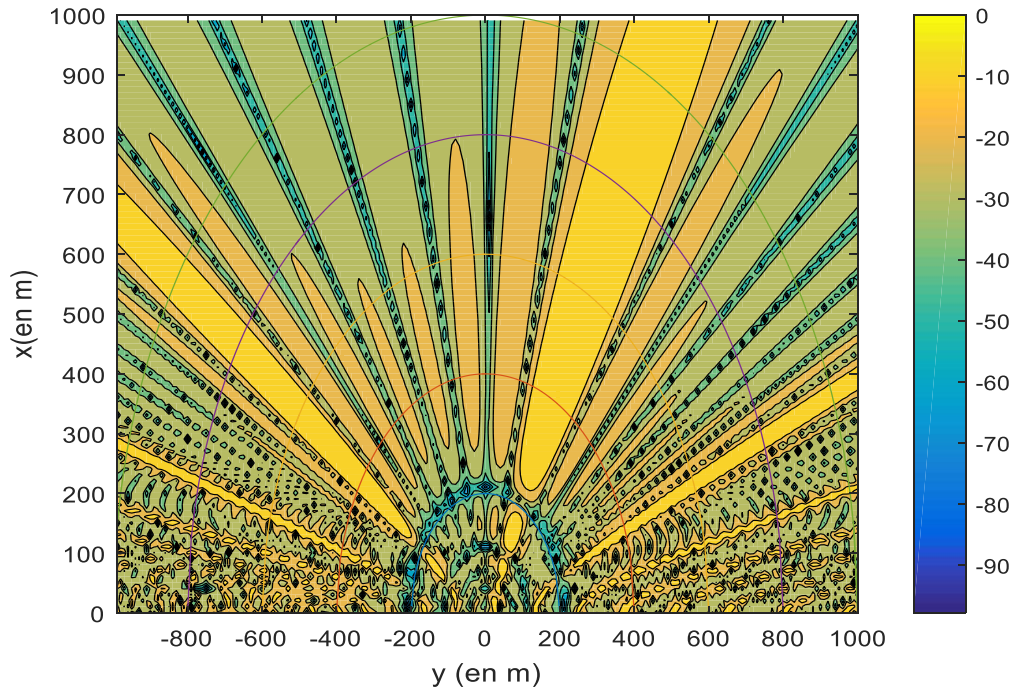


Figure IV-12 : Répartition de puissance normalisée au sol autour de l'antenne réseau 2D

Le faisceau est balayé jusqu'à $(\theta_0, \phi_0) = (93^\circ, 31^\circ)$ ce qui signifie qu'il pointe vers la limite de 1 km. Le tracé 2D montre la puissance reçue normalisée au sol, chaque contour étant un pas de 3 dB. Des nuls apparaissent ; Le premier nul inférieur à une élévation EL = -14° est pour $r = 200$ m (l'anneau bleu près du centre).

Il existe plusieurs exemples de formation de faisceaux 1D (unidimensionnel) et 2D avec des matrices mMIMO, comme le cas de plusieurs faisceaux transmis à partir d'un seul tableau mMIMO, un faisceau contenant un signal souhaité et un ou deux faisceaux contenant des signaux interférents (par conséquent, des signaux destinés pour les autres utilisateurs).

IV-2-2) Synthèse de faisceau par la méthode de Dolph Tchebychev :

La méthode de Dolph Tchebychev permet de trouver la répartition d'amplitude des courants d'alimentation des sources qui pour un gain donné donne le niveau de lobe secondaire recherché.

Cette méthode utilise le fait que la répartition optimale des amplitudes des sources est celle qui donne comme polynôme représentant le champ de N sources, le polynôme de Tchebychev de degré (N-1).

Le champ total rayonné par un alignement de N sources identiques équidistantes, alimentée avec des courants d'amplitudes A_i différentes et de phase φ progressive, est de la forme :

$$E_t(M) = E_0 f(\theta) \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{j(i\psi)}$$

Avec $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \phi - \varphi$

$F(\theta)$ est la fonction caractéristique d'une seule source. $F(\theta)=1$ si les sources sont isotropes

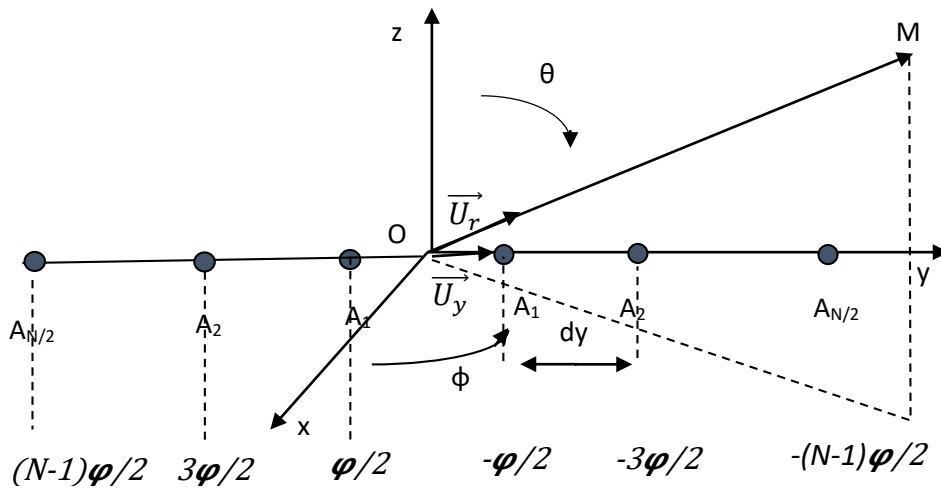


Figure IV-13 : Réseau de N sources identiques équidistantes, alimentée avec des courants d'amplitudes A_i différentes et de phase φ progressive

Pour une disposition symétrique des sources par rapport à l'origine (figure IV-13), le champ créé par un nombre pair de N sources isotropes s'écrit :

$$E_t = 2E_0 \sum_{k=1}^{N/2} A_k \cos\left((2k-1)\frac{\psi}{2}\right)$$

Le champ s'exprime donc par la somme de termes de la forme $\cos m \frac{\psi}{2}$

En posant $x = \cos \frac{\psi}{2}$

$$E_t = 2E_0 \left[A_1 T_1(x) + A_2 T_3(x) + A_3 T_5(x) + \dots + A_N T_{N-1}(x) \right]$$

$T_m(x)$: Polynôme de Tchebychev d'ordre m

Cette méthode utilise le fait que la répartition optimale est celle qui donne comme polynôme représentant le champ de N sources, le polynôme de Tchebychev de degré (N-1)

$$A_1 T_1(x) + A_2 T_3(x) + A_3 T_5(x) + \dots + A_N T_{N-1}(x) = T_{N-1}(X)$$

Soit R_0 le rapport entre le maximum du lobe principal et le niveau des lobes secondaires.

$$R_0 = 10^{R_0(\text{dB})/20}$$

Le maximum correspond à $x = X_0 > 1$ (lobe principal) alors que tous les lobes secondaires se trouvent dans la région d'adulation

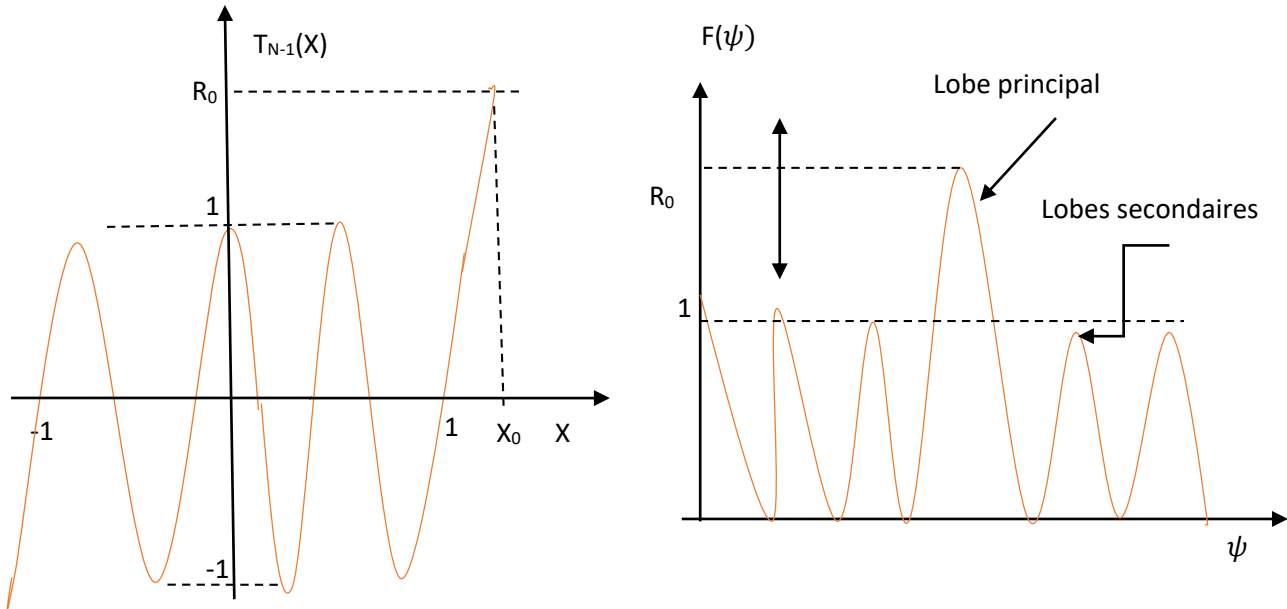


Figure IV-14 : Représentation du polynôme de Tchebychev de degré (N-1) rendant optimale la répartition d'amplitude et le diagramme du champ de N sources.

$$T_m(x) = \cos(m \cos^{-1}(x)) \quad \text{pour } |x| < 1$$

$$T_m(x) = \cosh(m \cosh^{-1}(x)) \quad \text{pour } |x| > 1$$

$$R_0 = T_{N-1}(X_0) = \cosh[(N-1) \cosh^{-1}(X_0)]$$

$$\Rightarrow X_0 = \cosh \left[\frac{\cosh^{-1} R_0}{N-1} \right]$$

$$\Rightarrow X_0 = \frac{1}{2} \left[\left(R_0 + \sqrt{R_0^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} + \left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} \right]$$

$$X_0 \text{ est plus grand que } 1 \Rightarrow x = \frac{x}{X_0} = \cos \frac{\psi}{2}$$

La méthode de Dolph Tchebychev a été appliquée pour $N=8$ sources selon $0y$ avec $d = 0,5 \lambda$ et $\phi = -22,5^\circ$ correspondant à un lobe principal selon $\Phi=7,2^\circ$

$$A_1 T_1(x) + A_2 T_3(x) + A_3 T_5(x) + A_4 T_7(x) = T_7(X)$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$$

$$T_7(x) = 64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x$$

Et pour une différence entre le niveau du lobe principal et celui des lobes secondaires :

$R_0 = 20 \text{ dB} \Rightarrow R_0 = 10$ et $X_0 = 1,093$

Les calculs donnent : $A_1 = 3,205$ $A_2 = 2,812$ $A_3 = 2,126$ $A_4 = 1,864$

Et le champ total créé est :

$$E_t = 2E_0 \left[3,205 \cos \frac{\psi}{2} + 2,812 \cos \frac{3\psi}{2} + 2,126 \cos \frac{5\psi}{2} + 1,864 \cos \frac{7\psi}{2} \right]$$

Un code Matlab a été écrit (voir annexe4) : ReseauTchebychev8.m.

Les résultats obtenus par la méthode de Dolph Tchebychev sont comparés à ceux obtenus avec une répartition uniforme d'amplitude (figure IV-15 et IV-16). Nous remarquons qu'avec la synthèse de Tchebychev le niveau des lobes secondaires est maintenu à une valeur inférieure ou égale à $R_0 = -20 \text{ dB}$ (dans ce cas) par rapport au lobe principal.

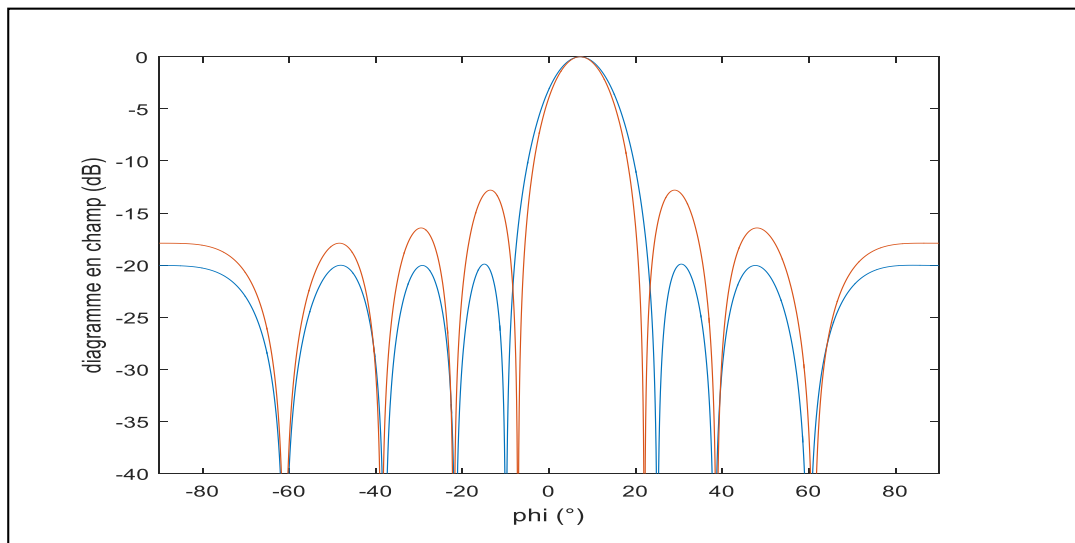


Figure IV-15 : Diagramme en champ en dB. Répartition équi-amplitudes : Courbe rouge. Synthèse de Dolph Tchebychev : Courbe bleue

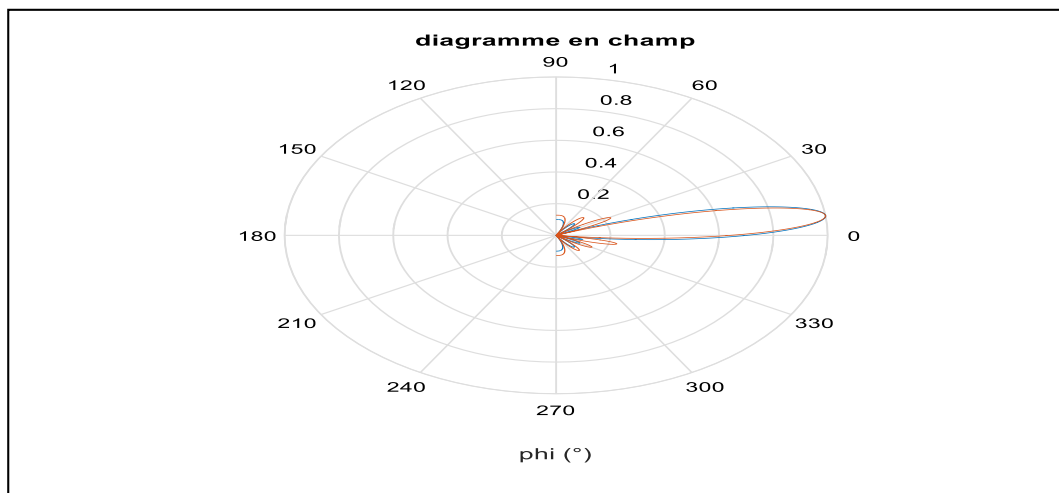


Figure IV-16: Diagramme en champ en coordonnées polaires

Commentaires :

La Figure/IV-5 et la Figure/IV-16 représentent le résultat de synthèse de diagramme de

rayonnement de réseaux d'antennes linéaires de 8 éléments rayonnants. On remarque d'après ces figures que les diagrammes de rayonnement sont contenus dans les limites imposées par le gabarit. On constate aussi que, la synthèse de réseaux d'antennes linéaires par la méthode de Dolph Tchebychev permet de réduire fortement le niveau maximum de lobes secondaires.

Avec cette méthode, tous les lobes secondaires du diagramme ont un même niveau, ce qui peut présenter un inconvénient si l'on désire que l'antenne assure une certaine protection contre les brouilleurs éloignés de l'axe de rayonnement maximal. Par contre, on peut démontrer qu'un réseau construit suivant cette méthode, présente toujours le maximum de gain compatible avec le niveau de lobes secondaires que l'on s'est imposé.

IV-3) Synthèse de lobe pour les antennes intelligentes

Le domaine de l'antenne intelligente et les algorithmes associés ont fait récemment l'objet de plusieurs travaux. L'objectif était de démontrer sa performance dans les systèmes de communication sans fil et de surmonter les limitations qui s'imposaient à savoir : la résolution angulaire, le compromis entre les nuls et le faisceau principal, le couplage mutuel entre les éléments de l'antenne, le nombre et le coût élevé des radios utilisées, la complexité des algorithmes, le temps de convergence des algorithmes, la taille physique du réseau d'antennes, etc.

L'approche la plus intéressante dans ce domaine est l'antenne adaptative. En effet, les algorithmes adaptatifs sont utilisés pour la mise à jour des poids des éléments du réseau en temps réel. Le patron de rayonnement s'adapte dynamiquement quand l'environnement des signaux change.

IV-3-1) Modèle du signal et terminologie

Une antenne intelligente peut être présentée comme un réseau d'antennes muni d'un système de traitement de signal numérique DSP comme le montre la figure IV-17.

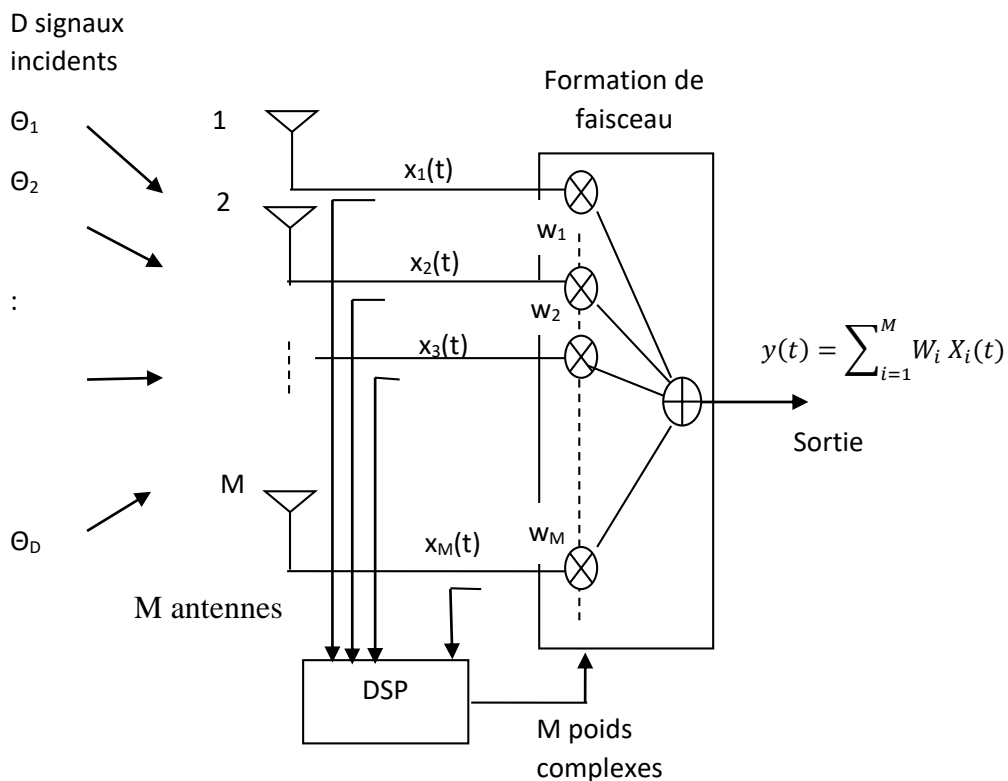


Figure IV-17 : Schéma simplifié d'une antenne intelligente [27]

On considère que l'antenne est constituée d'un réseau de M éléments omnidirectionnels dans un milieu homogène. Le signal provenant de chaque élément est pondéré avec un Poids complexe w_l , $l = 1, 2, \dots, M$. Les éléments sont équidistants de $d = \lambda/2$, le réseau est supposé placé dans les champs lointains de D sources sinusoïdales de fréquences f_0 , de telle façon que l'onde reçue sera considérée comme étant une onde plane θ_i , $i = 1, 2, \dots, D$, représentent les angles d'arrivée des signaux incidents. L'objectif des algorithmes d'estimation de la direction d'arrivée est de déterminer les angles d'incidence θ_i .

Un réseau de M éléments ne peut résoudre la direction d'arrivée de plus de $M-1$ sources. C'est une limitation physique et par conséquent le nombre D des sources incidentes doit être toujours inférieure à M ($D < M$). D'après la figure IV-18, le signal induit par la source i sur l'élément de référence ($l=1$) à un instant t donné est [41] :

$$S_i(t) = m_i(t)e^{j2\pi f_0 t}$$

$m_i(t)$ est la fonction de modulation complexe du signal incident à l'instant t .

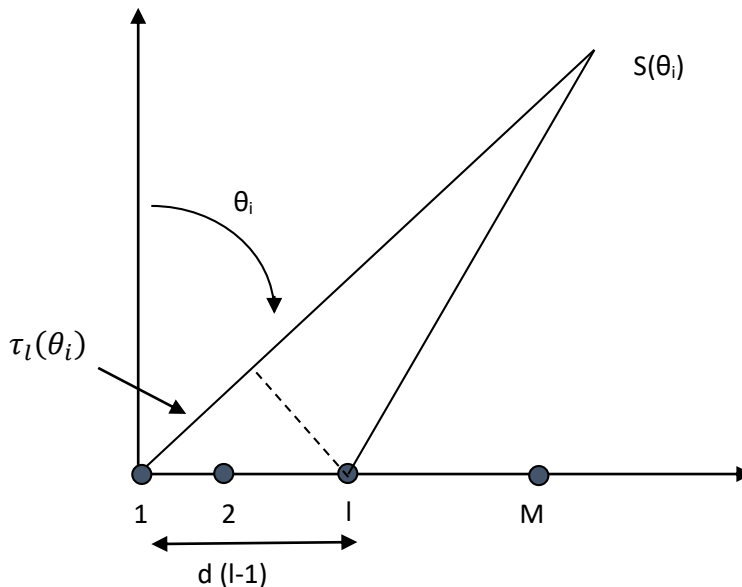


Figure IV-18: Signal incident sur un réseau d'antennes

Sur l'élément l du réseau, l'onde arrive $\tau_l(\theta_i)$ secondes avant qu'elle arrive sur l'élément de référence : $\tau_l(\theta_i) = \frac{d}{c}(i-1)\sin(\theta_i)$ (IV-1)

Le signal induit sur l'élément l dû à la source i devient :

$$s'_i(t) = m_i(t + \tau_l(\theta_i))e^{j2\pi f_0(t + \tau_l(\theta_i))} \dots\dots\dots(IV-2)$$

Si on considère que les dimensions du réseau sont suffisamment petites par rapport à la distance r qui sépare la source du centre du réseau d'antennes : $s'_i(t + \tau_l(\theta_i)) \cong S_i(t)$

Donc, le signal total induit par toutes les D sources et reçu sur l'élément l à l'instant t est :

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^D m_i(t) e^{j2\pi f_0(t+\tau_l(\theta_i))} + n_l(t)$$

Où $n_l(t)$ est le bruit généré sur l'élément l .

Sous forme matricielle, le signal total $X(t)$ reçu par les éléments du réseau s'écrit :

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & \dots & x_M(t) \\ \sum_{i=1}^D m_i(t) e^{j2\pi f_0(t+\tau_1(\theta_i))} + n_1(t) & \dots & \sum_{i=1}^D m_i(t) e^{j2\pi f_0(t+\tau_M(\theta_i))} + n_M(t) \end{bmatrix}^T$$

ou bien :

$$X(t) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta_1)} & \dots & e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta_D)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tau_M(\theta_1)} & \dots & e^{j2\pi f_0 \tau_M(\theta_D)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(t) e^{j2\pi f_0 t} \\ \vdots \\ m_D(t) e^{j2\pi f_0 t} \end{bmatrix} + [n_1(t) \dots n_M(t)]^T \dots \dots \dots \text{(IV-3)}$$

Soit : $X(t) = A(\theta).S(t) + N(t) \dots \dots \dots \text{(IV-4)}$

Avec :

$S(t)$: vecteur $D \times 1$ des signaux incidents

$$S(t) = [s_1(t) s_2(t) \dots s_D(t)]^T \dots \dots \dots \text{(IV-5)}$$

$A(\theta)$: matrice $M \times D$ de vecteurs de directions :

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta_1)} & e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta_2)} & \dots & e^{j2\pi f_0 \tau_1(\theta_D)} \\ e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta_1)} & e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta_2)} & \dots & e^{j2\pi f_0 \tau_2(\theta_D)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tau_M(\theta_1)} & e^{j2\pi f_0 \tau_M(\theta_2)} & \dots & e^{j2\pi f_0 \tau_M(\theta_D)} \end{bmatrix}$$

$$= [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_D)] \dots \dots \dots \text{(IV-6)}$$

Avec $a(\theta_i), i = 1, 2, \dots, D$ vecteurs de direction θ_i

$N(t)$: vecteur $1 \times M$ de bruits :

$$N(t) = [n_1(t) n_2(t) \dots n_M(t)] \dots \dots \dots \text{(IV-7)}$$

La sortie $y(t)$ de l'antenne intelligente peut être écrite donc sous la forme suivante :

$$y(t) = W^T * X(t) \dots \dots \dots \text{(IV-8)}$$

Où $W^T = [w_1 w_2 \dots w_M]$ est le vecteur poids du réseau d'antennes

IV-3-2) Estimation des directions d'arrivée :

La localisation par une antenne intelligente est possible grâce à des algorithmes numériques d'estimation de la direction d'arrivée. Le but de ces techniques d'estimation est de définir une fonction pseudo spectrale, PS, qui donne une indication sur l'angle d'arrivée des signaux. Il existe plusieurs approches pour le définir : Capon, MUSIC, ESPRIT [27], [40] etc.

IV-3-3) Beamforming numérique :

Beamforming " numérique Selon le critère choisi, il existe plusieurs approches pour optimiser les poids d'un réseau d'antennes pour un "beamformer" numérique. Ce critère peut être par exemple de maximiser le rapport signal à interférence SIR, minimiser l'erreur quadratique en utilisant un signal de référence, minimiser la variance du bruit, etc. Nous allons présenter dans ce paragraphe la méthode **SIR maximal** qui est une des plus populaires.

La figure III.3 montre le cas d'un "beamformer" numérique classique. Le but est d'optimiser les poids w_l qui maximisent le rapport SIR. Un signal désiré est incident de la direction ϑ_0 et N interférents sont incidents des directions $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N$. Le réseau d'antennes est constitué par M éléments et M poids associés. On suppose que le nombre de signaux incidents est inférieur au nombre d'éléments d'antenne $N + 1 \leq M$.

Les ondes reçues sont toujours supposées être planes. Le bruit sur chaque élément est Blanc gaussien de variance σ_b^2 .

La sortie du "beamformer" est donné par :

$$y(t) = w^T * X(t) \dots \dots \dots (IV-9)$$

Nous avons déjà établi l'expression de $x(k)$, formule IV.4 paragraphe IV.3.1, qui est donné par :

$$X(t) = A(\vartheta) \cdot S(t) + N(t) \dots \dots \dots (IV-10)$$

Avec :

$$A(\theta) = \{a(\theta_0)a(\theta_1) \dots a(\theta_N)\} \dots \dots \dots (IV-11)$$

Et :

$$S(t) = [s_0(t)s_1(t) \dots s_N(t)]^T \dots \dots \dots (IV-12)$$

On peut réécrire $x(k)$ sous la forme suivante :

$$X(t) = D(t) + I(t) \dots \dots \dots (IV-13)$$

Avec :

$D(t) = a(\theta_0) \cdot S_0(t)$ représentant le signal désiré et $I(t)$ présentant les signaux indésirables (interférences et bruit).

$$I(t) = [a(\theta_1)a(\theta_2) \dots a(\theta_N)]. [s_1(t)s_2(t) \dots s_N(t)]^T + N(t) \dots \dots \dots (IV-14)$$

La sortie du beamformer devient :

$$\begin{aligned} y(t) &= W^T \cdot X(t) = W^T \cdot (D(t) + I(t)) \dots \dots \dots (IV-15) \\ &= W^T \cdot D(t) + W^T \cdot I(t) \end{aligned}$$

On peut maintenant calculer les matrices de correction pour le signal désiré R_{dd} est les signaux indésirables : R_{ii}

$$R_{dd} = E[D(t) \cdot D(t)^H] \dots \dots \dots (IV-16)$$

$$R_{ii} = E[I(t) \cdot I(t)^H] \dots \dots \dots (IV-17)$$

Le rapport signal à interférences à la sortie peut être défini comme étant égal à la puissance du signal désiré, divisé par la puissance du bruit et des interférences, soit :

$$\sigma_d^2 = E[|W^T \cdot I(t)|^2] = W^T E[I(t) \cdot \bar{I}(t)^H] \cdot W = W^T \cdot R_{ii} \cdot W \dots \dots \dots (IV-18)$$

D'où :
$$SIR = \frac{W^T \cdot R_{dd} \cdot W}{W^T \cdot R_{ii} \cdot W} \dots \dots \dots (IV-19)$$

Ce qui donne l'égalité suivante :

$$R_{dd} \cdot W = SIR \cdot R_{ii} \cdot W \dots\dots\dots(IV-20)$$

En réarrangeant les termes de la dernière égalité, nous obtenons :

$$R_{ii}^{-1} R_{dd} \cdot W = SIR \cdot W \dots\dots\dots(IV-21)$$

C'est une équation à vecteurs propres avec les SIR comme des valeurs propres. Le SIR maximal, SIR_{max} , est égal à la plus grande valeur propre de l'équation. Le vecteur propre associé à cette valeur propre est le vecteur poids optimal recherché W_{opt}

Un code Matlab a été écrit (voir annexe5) : **Beamformer.m**

Pour valider les résultats avec la littérature [JABER], Il a été appliqué pour un réseau linéaire uniforme à 4 éléments équidistants avec les données suivantes :

Distance entre sources $d=\lambda/2$

Bruit blanc additif de variance $\sigma_b^2 = 0.01$.

Le signal désiré est incident de la direction $\theta_0 = 25^\circ$ et que deux signaux interférents arrivent des directions $\theta_1 = 0^\circ$ et $\theta_2 = -45^\circ$. Nous supposons aussi que tous les signaux ont une amplitude constante.

Les calculs ont donné un nombre d'antennes= 4:

nombre de signaux reçus sur le réseau 3

direction du signal désire en degré 25

direction du signal non désire en degré 0

direction du signal non désire en degré -45

$R_{dd} =$

$$\begin{matrix} 1.0000 + 0.0000i & 0.2407 - 0.9706i & -0.8841 - 0.4673i & -0.6664 + 0.7456i \\ 0.2407 + 0.9706i & 1.0000 + 0.0000i & 0.2407 - 0.9706i & -0.8841 - 0.4673i \\ -0.8841 + 0.4673i & 0.2407 + 0.9706i & 1.0000 + 0.0000i & 0.2407 - 0.9706i \\ -0.6664 - 0.7456i & -0.8841 + 0.4673i & 0.2407 + 0.9706i & 1.0000 + 0.0000i \end{matrix}$$

$R_{ii} =$

$$\begin{matrix} 2.0100 + 0.0000i & 0.3943 + 0.7957i & 0.7337 - 0.9639i & 1.9282 + 0.3720i \\ 0.3943 - 0.7957i & 2.0100 + 0.0000i & 0.3943 + 0.7957i & 0.7337 - 0.9639i \\ 0.7337 + 0.9639i & 0.3943 - 0.7957i & 2.0100 + 0.0000i & 0.3943 + 0.7957i \\ 1.9282 - 0.3720i & 0.7337 + 0.9639i & 0.3943 - 0.7957i & 2.0100 + 0.0000i \end{matrix}$$

$R_i R_d =$

$$\begin{matrix} 95.9123 - 2.6613i & 20.5044 - 93.7327i & -86.0409 - 42.4643i & -61.9270 + 73.2891i \\ 60.0003 + 72.5680i & 84.8771 - 40.7679i & -19.1380 - 92.1948i & -94.0907 - 3.6174i \\ -94.0907 + 3.6174i & -19.1380 + 92.1948i & 84.8771 + 40.7679i & 60.0003 - 72.5680i \\ -61.9270 - 73.2891i & -86.0409 + 42.4643i & 20.5044 + 93.7327i & 95.9123 + 2.6613i \end{matrix}$$

Les poids optimaux calculés sont:

$W =$

$$0.5047 + 0.0000i$$

$$0.3049 + 0.3903i$$

$$-0.4952 + 0.0053i$$

$$-0.3149 - 0.3944i$$

En appliquant ces poids aux éléments du réseau, le diagramme de rayonnement synthétisé obtenu est donné sur les figures IV-19 et IV-20

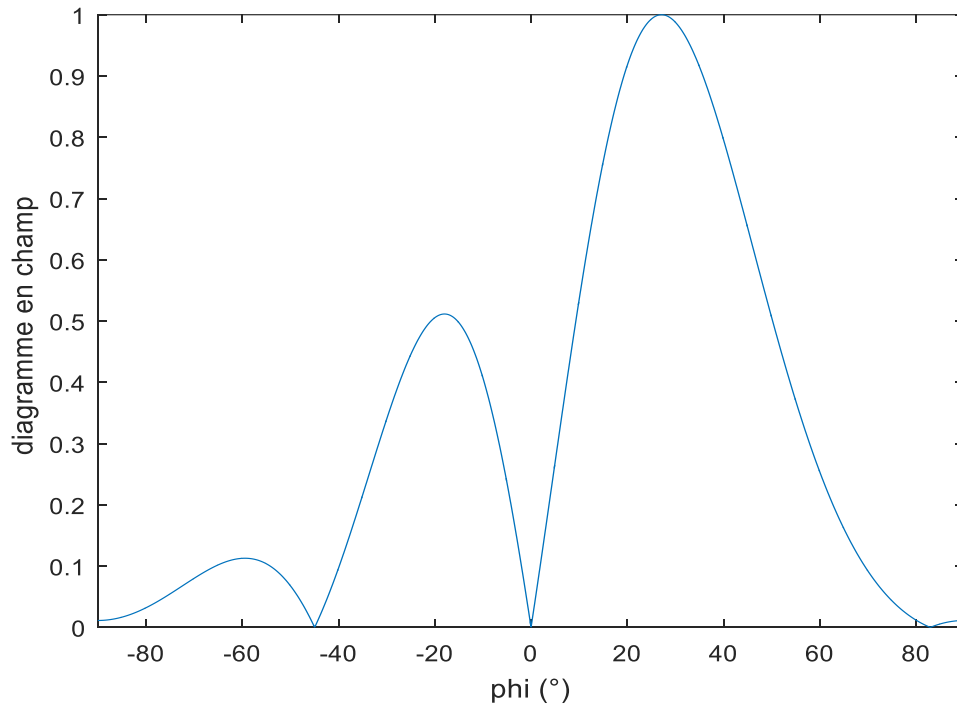


Figure IV-19 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 4 antennes

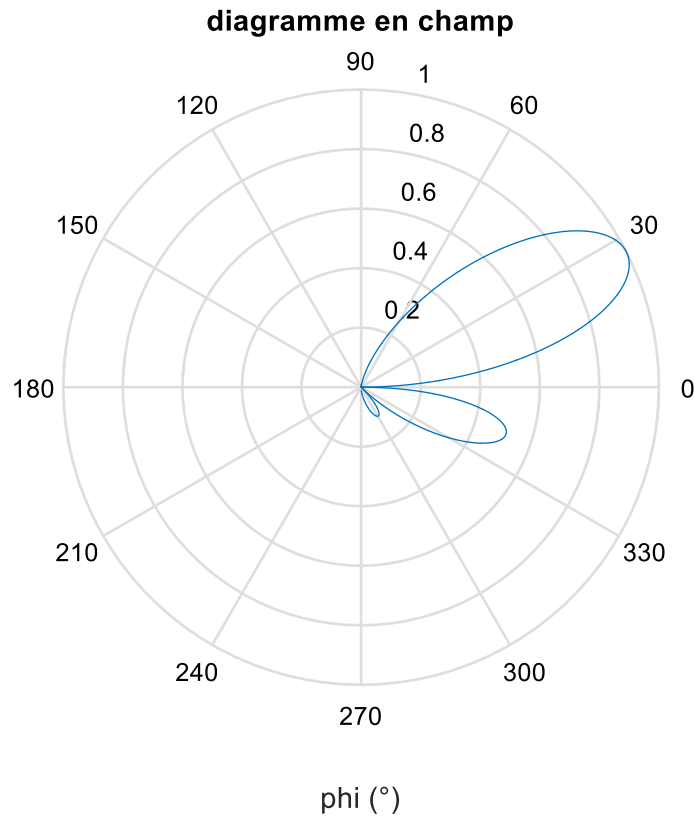


Figure IV-20 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 4 antennes. Représentation polaire.

On voit bien sur les figures IV-19 et IV-20 que le diagramme synthétisé présente un lobe principal à 25° dans la direction du signal désiré et des zéros pour 0° et -45° dans la direction des signaux interférents. C'est ce qui est attendu.

Pour M=8 antennes, nous obtenons comme poids :

W =

$$-0.1691 + 0.2635i$$

$$-0.3172 - 0.1339i$$

$$0.1776 - 0.2697i$$

$$0.4233 + 0.0000i$$

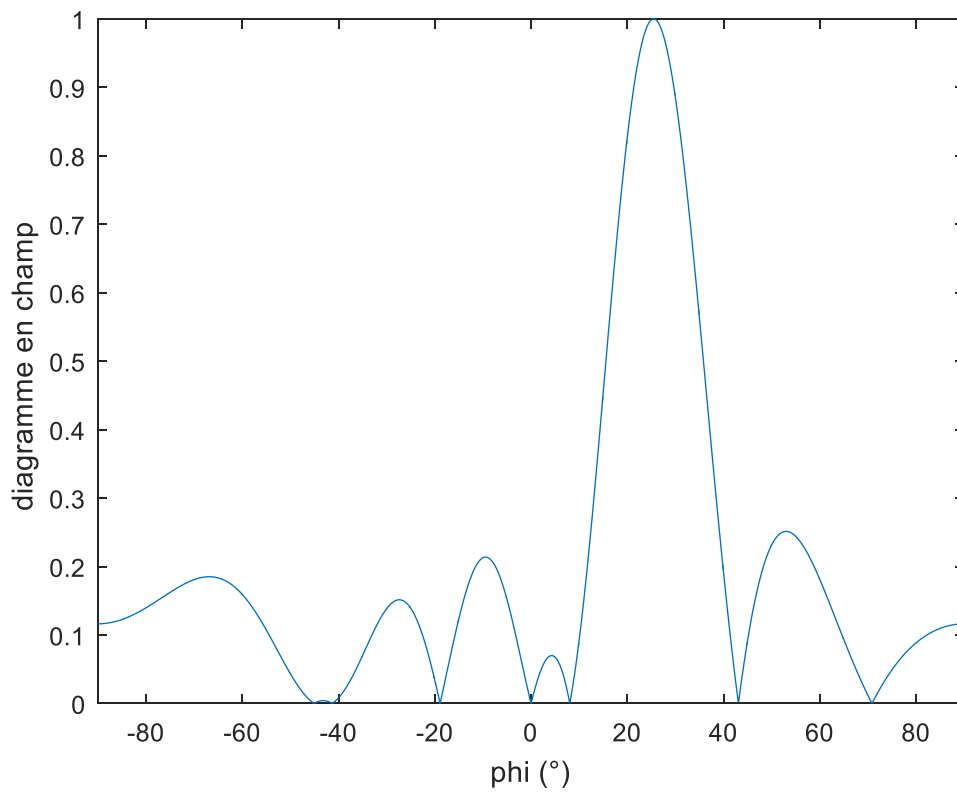
$$0.0823 + 0.4152i$$

$$-0.2300 + 0.2266i$$

$$-0.1930 - 0.2851i$$

$$0.2256 - 0.2171i$$

En appliquant ces poids aux éléments du réseau de 8 antennes, le diagramme de rayonnement synthétisé obtenu est donné sur les figures IV-21 et IV-22



FigureIV-21 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 8 antennes.

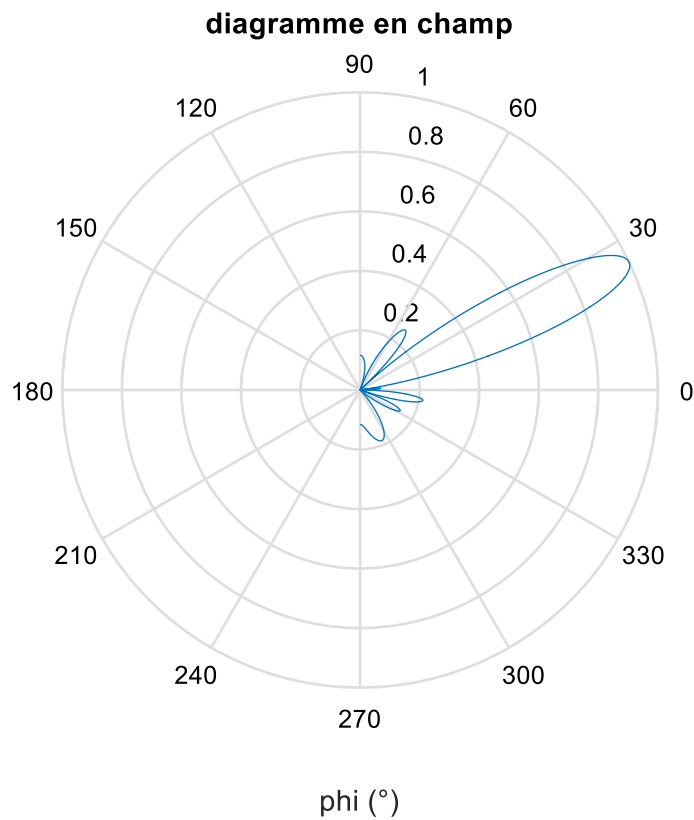


Figure IV-22 : Diagramme synthétisé avec un réseau de 8 antennes. Représentation polaire.

Le diagramme synthétisé présente bien un lobe principal à 25° dans la direction du signal désiré et des zéros pour 0° et -45° dans la direction des signaux interférents. C'est ce qui est attendu. Le faisceau obtenu pour 8 antennes est plus directif que celui obtenu pour 4 antennes et le niveau des lobes secondaires est moins élevé.

IV-3-4) Beamforming analogique :

Le "beamforming" analogique est à la base des systèmes à commutation de faisceau. (schéma de principe présenté à figure III.7).

L'une des méthodes les plus populaires pour concevoir un "beamformer" analogique est la matrice de Butler [40]. Une matrice de Butler $N \times N$ possède N entrées (ports) et N sorties connectées à un réseau d'antennes. C'est un réseau de déphasage passif constitué dans la plupart des cas par des coupleurs hybrides et des déphaseurs fixes. L'interconnexion entre ces circuits permet d'obtenir le déphasage nécessaire pour avoir N lobes orthogonaux. Le nombre d'entrées N doit être toujours une puissance de 2. Une matrice $N \times N$ est réalisable par $N/2 * \text{Log}_2(N)$ coupleurs et $N/2 * \text{Log}_2(N-1)$ déphaseurs fixes [43].

Matrice Butler 4x4

La figure IV-23 illustre le cas d'une matrice de Butler 4x4 ; elle utilise 4 coupleurs hybrides et 2 déphaseurs.

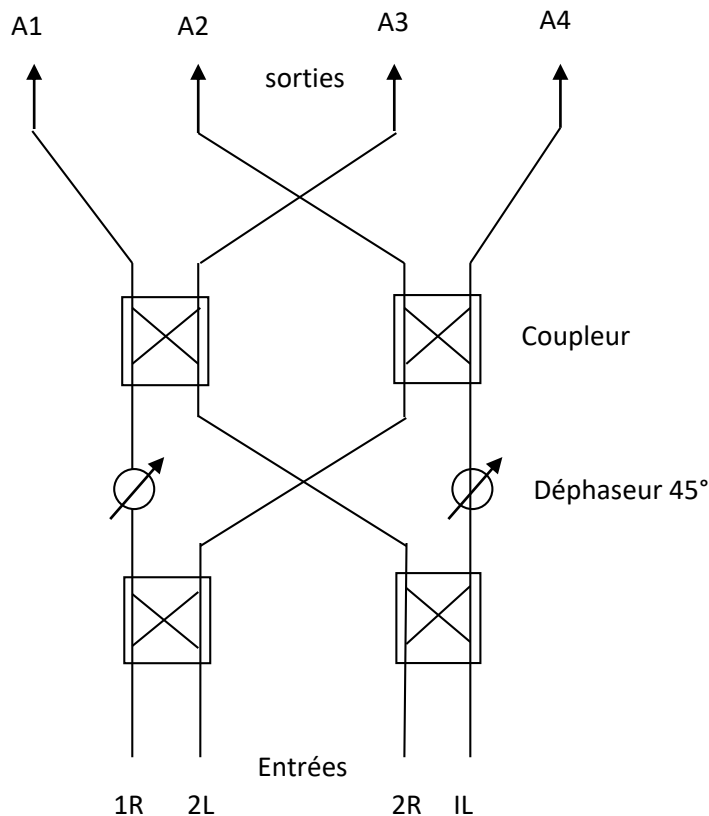


Figure IV-23 : Matrice Butler 4x4

Le coupleur est en général un coupleur hybride 90° (-3dB) ; son schéma symbolique est donné à la figure IV-24.

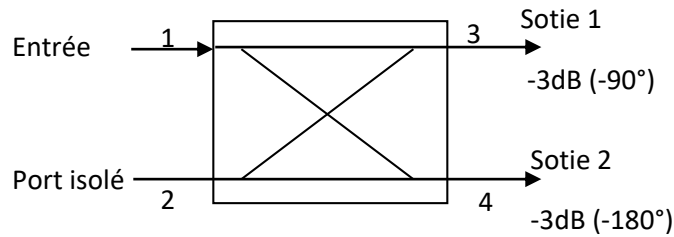


Figure IV-24 : Coupleur hybride 90° (-3dB)

Sa matrice [S] est donnée par [43] :

$$[S] = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les déphaseurs sont réalisés par des lignes de transmission.

Un signal RF appliqué à l'une des entrées (1R, 2L, 1L ou 2R) de la matrice produira en sortie 4 excitations de même amplitude avec un déphasage progressif constant. Le tableau suivant donne les déphasages obtenus.

Entrée	Sorties				
	A1	A2	A3	A4	Déphasage progressif
1R	-225°	-270°	-315°	-360°	-45°
2L	-315°	-180°	-405°	-270°	135°
2R	-270	-405	-180°	-315°	-135°
1L	-360	-315	-270	-225	45°

Tableau IV-1 : Déphasages produits en sortie de la matrice 4x4 pour des signaux appliqués aux différentes entrées. Les déphasages progressifs nécessaires sont mentionnés

Un code Matlab a été écrit : **Buter4.m (voir annexe)**

Dans les cas d'un réseau d'antennes isotropes à 4 éléments équidistants de $d=\lambda/2$, la matrice de Butler de la figure IV-23 donnerait le diagramme de rayonnement illustré dans la figure IV.21 avec 4 lobes orthogonaux dans la direction :

- 14,47° si le signal est appliqué à l'entrée 1L, (L pour Left : déviation à gauche)
- 48,59° si le signal est appliqué à l'entrée 2L,
- 14,47 si le signal est appliqué à l'entrée 1R, (R pour Right : déviation à droite)
- 48,59 si le signal est appliqué à l'entrée 2R.

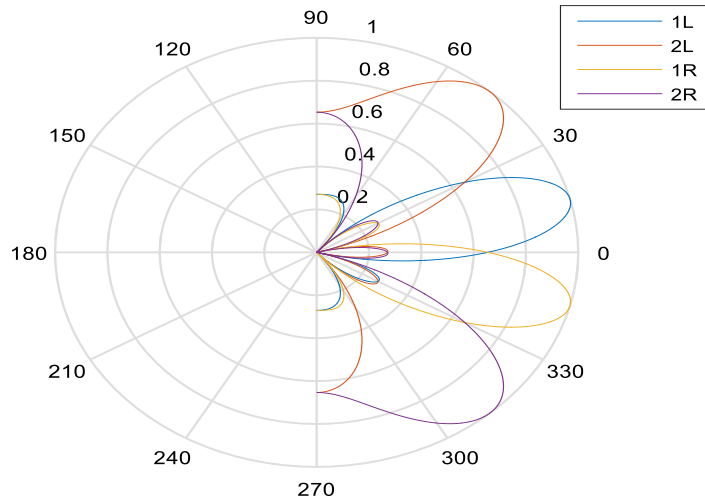


Figure IV-25 : Les 4 lobes orthogonaux du réseau d'antennes à 4 éléments isotropes.

Matrice Butler 8x8

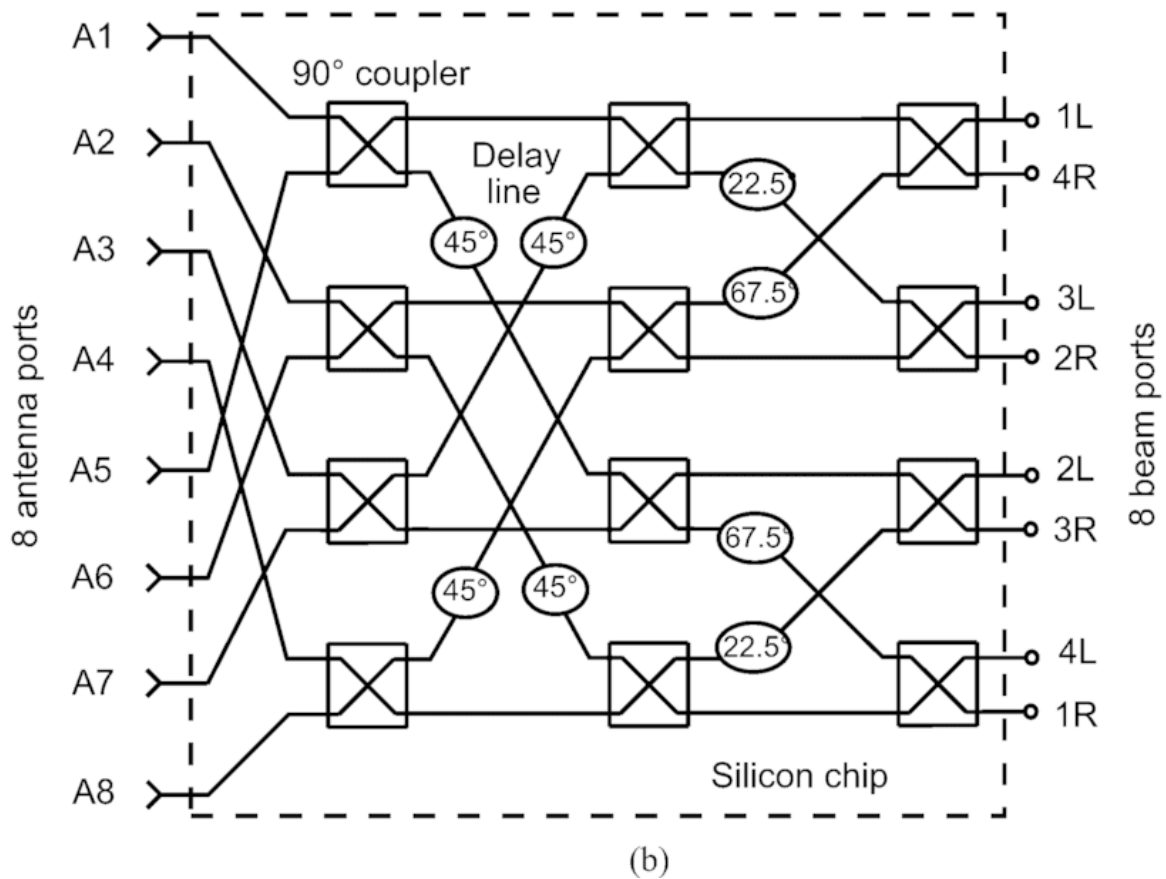
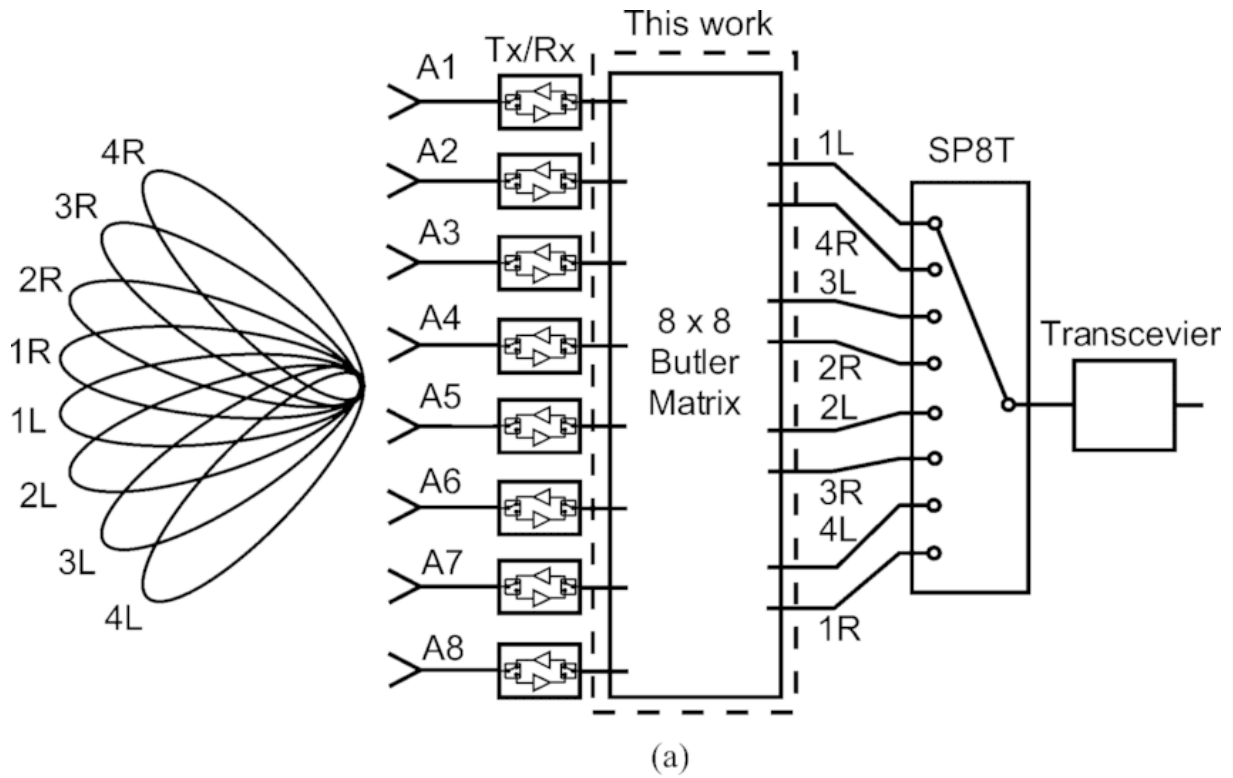


Figure IV-26: Matrice Butler 8x8 [38]

<i>Ant. Port</i>	<i>Beam Ports</i>							
	1L	4R	3L	2R	2L	3R	4L	1R
A1	90	-180	157.5	-112.5	135	-135	157.5	-112.5
A2	112.5	22.5	-90	-180	-157.5	112.5	-45	-135
A3	135	-135	22.5	112.5	-90	0	112.5	-157.5
A4	157.5	67.5	135	45	-22.5	-112.5	-90	-180
A5	-180	-90	-112.5	-22.5	45	135	67.5	157.5
A6	-157.5	112.5	0	-90	112.5	22.5	-135	135
A7	-135	-45	112.5	-157.5	-180	-90	22.5	112.5
A8	-112.5	157.5	-135	135	-112.5	157.5	-180	90
$\Delta\Phi$	22.5	-157.5	112.5	-67.5	67.5	-112.5	157.5	-22.5
Beam Angle	-7	+61	-39	+22	-22	+39	-61	+7

*All in degrees

Tableau IV-2 : Déphasages produits en sortie de la matrice 8x8 pour des signaux appliqués aux différentes entrées. Les déphasages progressifs nécessaires et les directions des lobes principaux sont mentionnés [38].

Un **code Matlab est écrit : Butler8.m** (voir annexe).

La matrice de Butler de la figure IV-26 donne le diagramme de rayonnement suivant, illustré dans la figure IV-27. Il montre 8 lobes orthogonaux conformes aux directions mentionnées dans le tableau IV.2.

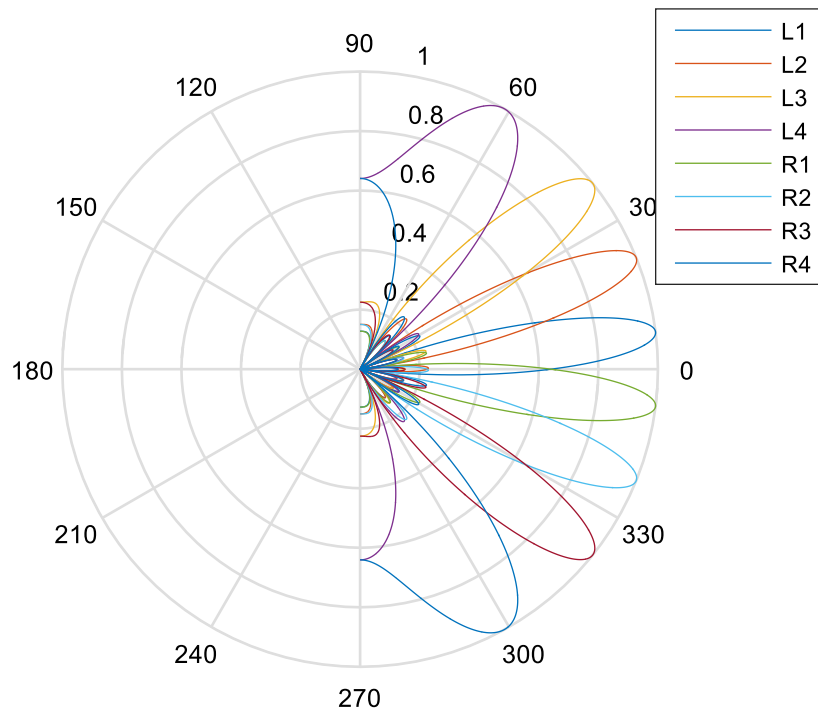


Figure IV-27 : Les 8 lobes orthogonaux du réseau d'antennes à 8 éléments isotropes.

Avantages et inconvénients de la matrice de Butler :

La matrice de Butler possède de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

Un réseau simple employant peu de types de composants (des coupleurs et des déphaseurs fixes), qui est facilement mis en œuvre par l'utilisation des lignes micro-rubans.

Les faisceaux produits ont une largeur étroite et une bonne directivité.

La matrice idéale de Butler est l'équivalent analogue de la transformée discrète de Fourier, elle a un nombre minimum de composants et une longueur de chemin minimale parmi tous les réseaux de formation de faisceaux à excitation uniforme.

La matrice a un niveau presque constant de croisement de faisceaux qui ne change pas avec la fréquence. Ceci permet un bon modèle de rayonnement (presque un arc parfait) et un gain maximum du système dans une direction quelconque du secteur de couverture.

Elle réalise le pointage électronique dans l'espace sans mouvement mécanique dans le procédé de balayage.

Elle est théoriquement « sans perte » puisque les pertes d'insertions minimales dans les coupleurs, les déphaseurs et les lignes de transmissions utilisées ne rendent pas le système impraticable.

La conception de grandes matrices est assez facile puisque les déphaseurs sont placés symétriquement par rapport à la ligne de phase. Toutefois, la matrice de Butler n'est pas un circuit d'alimentation parfait, elle a les inconvénients suivants :

La largeur de faisceau et la direction de pointage changent avec la fréquence.

L'interconnexion est assez complexe pour une grande matrice (beaucoup de croisements, par exemple plus de 16 croisements sont nécessaires pour une matrice 8*8).

Le nombre de composants est grand quand le nombre d'éléments du réseau est grand.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la formation de faisceau dans les systèmes d'antennes intelligentes utilisés dans les réseaux de communication sans fil de cinquième génération.

Nous avons présenté les différentes générations de la téléphonie mobile et donné une vue globale sur la technologie de cinquième génération (5G).

Les problèmes liés à la propagation multi trajets des ondes électromagnétiques dans un environnement réel ont été montrés et les solutions apportées grâce à la diversité et la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ont été exposées.

La technique des systèmes massive MIMO (MIMO à grande échelle) utilisant un grand nombre d'antennes intelligentes, appliquée dans la technologie 5G a été présentée.

Les réseaux d'antennes sont à la base de ces systèmes. L'avantage principale des réseaux d'antennes par rapport à une antenne simple est leurs capacités de balayage électronique, c'est-à-dire que le lobe principal peut être orienté vers n'importe quelle direction en changeant la phase du courant d'excitation de chaque élément de réseau.

Les techniques fixes de formation de faisceau obtenu par un alignement de sources équidistantes, d'égales amplitudes et de phase progressive ont été d'abord abordées. Il a été remarqué lors de l'augmentation du nombre d'éléments, les diagrammes de rayonnement sont caractérisés par un lobe principal plus directif mais le niveau des lobes secondaires reste inchangé.

La synthèse par la méthode de Dolph Tchebychev a été développée pour régler le niveau des lobes secondaires à un niveau désiré.

La formation de faisceau utilisée dans les systèmes d'antennes intelligentes est ensuite abordée. La formation de faisceaux est une technique clé qui est utilisée pour améliorer le rapport signal sur bruit des signaux reçus, éliminer les sources d'interférences indésirables et concentrer les signaux transmis sur un emplacement spécifique. L'approche la plus intéressante dans ce domaine, est l'antenne adaptative. Les algorithmes utilisés pour la mise à jour des poids des éléments du réseau s'adaptent en temps réel. Nous avons utilisé pour optimiser le faisceau, le critère qui permet de maximiser le rapport signal à interférences SIR. Les résultats obtenus pour 4 puis 8 antennes sont spectaculaires.

L'autre approche étudiée, est analogique. Elle est à la base des systèmes à commutation de faisceau ; elle utilise la matrice de Butler. Deux cas sont traités : le cas de 4 antennes et celui de 8 antennes.

A chaque fois des codes Matlab sont écrits et exécutés pour montrer la formation de faisceaux par les techniques décrites.

La technologie des antennes intelligentes présente une révolution dans le domaine de la télécommunication, grâce aux avantages qu'elle offre : des signaux plus directifs, des diagrammes de rayonnement plus optimisés, un rapport signal à interférences SIR plus important et un débit plus élevé qui répond aux besoins des utilisateurs.



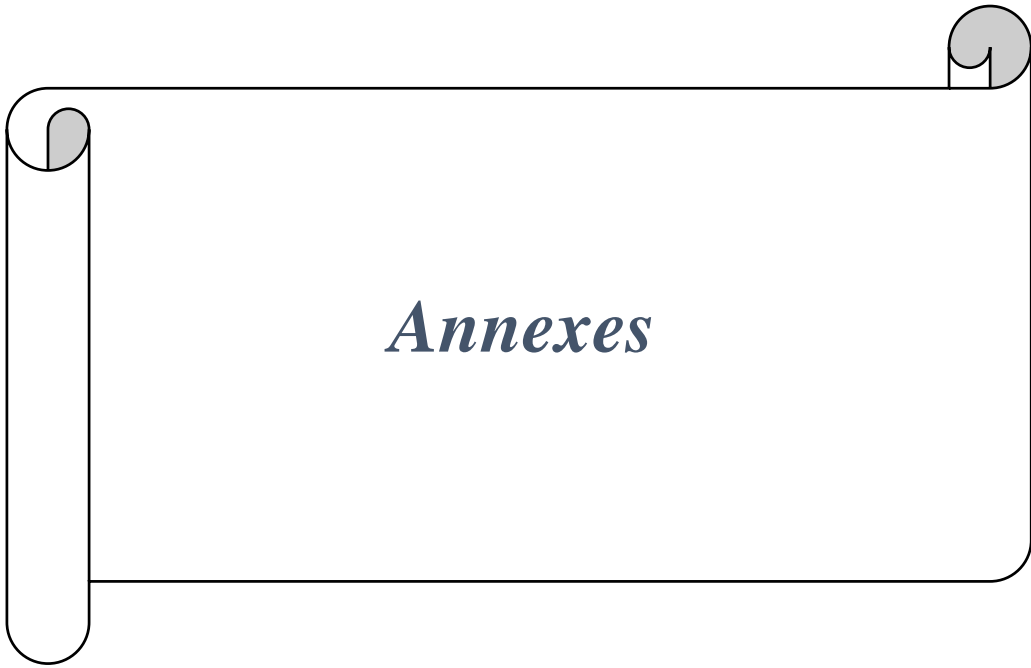
Références bibliographiques

Les références biographiques :

- [1] <http://www.marche-public.fr/Terminologie/Entrees/1G.htm> 1G 2G 3G et 4G génération des systèmes
- [2] <https://www.myforfaitmobile.com/aides-telephonie/difference-reseaux-telephonie-mobile> réseaux 2G, 3G/3G+, H+, 4G et 4G+
- [3] <https://selectra.info/telecom/guides/technologies/reseaux-mobile> la couverture mobile des opérateur
- [4] <https://www.recevoirlatnt.fr/particuliers/deploiemen> définition de la 4G
- [5] R.Sapakal, S. Kadam « 5G Mobile Technologie » Journal international de recherche
- [6] La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) Décembre 2018- Netcom 32(32-1/2):139-162
- [7] Etude de massive MIMO pour 5G.pdf- DACI Kaoutar • DOU Warda - juin 2019 page 14-23
- [8] Xiang, Wei, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen, eds. 5G mobile communications. Springer, 2016.
- [9] Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G - Juillet 2019
- [10] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey» Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.
- [11] Docomo «DOCOMO 5G White Paper» Juillet 2014.page 9
- [12] Massive MIMO Networks Spectral, Energy, and Hardware Efficiency Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti
- [13] Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC-Bendahmane Amira Meriem et Ghermoul Rania -le 25/06/2018
- [14] Etude de massive MIMO pour 5G-pdf-DACI Kaoutar • DOU Warda-n juin 2019
- [15] Etude de cas sur un système médical domotique contrôlé par un sam -pdf- hadjadji walid 13/06/2018 page 11
- [16] M. Jankiraman, Space-time Codes and MIMO system. Artech House 2004.
- [17] J. B. Keller. 'Geometrical Theory of Di_raction'. J. Opt. Soc. Am, 52(2) : 116-130,1962. Cite en page 22.
- [18] Contribution à l'étude et à la synthèse d'antennes intelligentes Applications aux communications mobiles. Pdf OPTION: Télécommunications Par: MEKHANCHA Sarra 2012 page 16-26-

- [19] Etude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux V ANET Hamou Chehri juin,2014 page 17
- [20] M. Jankiraman, Space-time Codes and MIMO system. Artech House 2004.
- [21] T. S. Rappaport, Wireless communications : principles and practice : Prentice Hall PTR, 2002.
- [22] Qu'est-ce que Multipath Propagation Date:2016/3/28 14:44:08 Hits:2170
- [23] S. R. Saunders and A. Aragon, Antennas and Propagation for Wireless communication Systems. Wiley & Sons, 2. a. ed., May 2007.
- [24] Synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité Mesures Alaa CHOUMANE le 24 Juin 2011 page 12-24
- [25] S. Y. Wang, P.F. Wang, Y. W. Li, and L.C. Lau, "Design and Implementation of a more Realistic Radio Propagation Model for Wireless Vehicular Networks over the NCTUns Network Simulator", IEEE WCNC (Wireless Communications and Networking Conference),
- [26] Najib Fadlallah « Contribution à l'optimisation de la synthèse du lobe de rayonnement pour une antenne intelligente. Application à la conception de réseaux à déphasage » Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de limoges Mai 2005.
- [27] Mouhamadou « Contribution au développement et à l'optimisation d'un démonstrateur d'antennes adaptatives Applications à des systèmes de communications sans fil haut débit: WiMax » Thèse Pour obtenir le grade de docteur de l'université de limoges Septembre 2007.
- [28] MEKHANCHA Sarra, 'Contribution à l'étude et à la synthèse d'antennes intelligentes Applications aux communications mobiles'. Pdf OPTION: Télécommunications 2012 page 16-26-
- [29] W.C.Y. Lee, Y.S. Yeh, "Polarization diversity system for mobile radio", IEEE Trans. Commun. Vol. COM-20, No. 5, pp912-923, 1972.
- [30] P. Muthu Chidambara Nathan, "Wireless Communication", PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008
- [31] "'''''''' Corporation, B. *What is 802.11 n*. Broadcom Corporation 2007 [cited; Available from: <http://80211n.com/what-is-80211n.html>].
- [32] Wikimedia Foundation, I. WiMAX MEVIO. 2007 [cited Consulté le 01 Novembre 2007; Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX_MIMO].
- [33] Conception de systèmes antennaires MIMO multi-standards LTE pour les nœuds relais.pdf- Lamia Sadaoui 24 Apr 2019 page 25
- [34] G. J. Foschini, « Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas », Bell labs technical journal, vol. 1, no 2, p. 41– 59, 1996

- [35] "Smart_antenna" (Authors); it is used under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported License
- [36] Conception d'antennes réseaux aux performances optimisées par la prise en compte des couplages inter éléments. Application à la formation de faisceau et à la polarisation circulaire .PDF- Ahmad ELSAYED AHMAD Le 14 décembre 2010 page 23
- [34] HAJRI, Salah Eddine. (Thèse de doctorat 2018). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université Paris Saclay.
- [36] Xiang, Wei, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen, eds. 5G mobile communications. Springer, 2016.
- [37] Butler, J. and R. Lowe, Beam forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas. Electron. Design, Apr. 1961. Volume 9: p. 170-173.
- [38] Lipsky, Stephen E., *Microwave Passive Direction Finding*, SciTech Publishing, 2004 [ISBN 9781891121234](#)
- [39] Utilisation des antennes intelligentes dans les systèmes de communications sans fil-AOUNALLAH NACEUR-Année Universitaire 2014-2015 page 39
- [40] JABER Zouhair. 'Conception d'une antenne intelligente à faisceau commutable par un système de localisation des mobiles'. Maitrise en Génie Electrique – Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec- Le 29 février 2008
- [41]1994-2020 The MathWorks, Inc.
- [42] Gross, F.B., Smart antennas for wireless communications : with MATLAB. 2005, New York: McGraw-Hill. xiv, 270 p.
- [43]Denidni, T. A. and T.E. Libar. *Wide band four-port butler matrix for switched multibeam antenna arrays*. 2003.
- [44] <https://ilearningx.huawei.com/courses/course-v1:HuaweiX+PACDCSREN001+Self->
- [45] On the carrier side of things, Verizon has reportedly sought permission to test C band transmissions using Ericsson equipment in Basking Ridge, New Jersey; Westlake, Texas; Sunnyvale, California; and Grand Rapids and Lansing, Michigan.
Publié par Catherine Sbeglia on SEPTEMBER 14, 2020
- [46] [https://www.rcrwireless.com/20200914/5g/ericsson-achieves-5-4-gbps-throughput-on-c-band-network-at-texas-hqs? \)](https://www.rcrwireless.com/20200914/5g/ericsson-achieves-5-4-gbps-throughput-on-c-band-network-at-texas-hqs?)



Annexes

Annexe1 : Code Matlab pour la simulation du diagramme de rayonnement produit par un alignement de sources isotropes selon Oz, équidistantes avec phase progressive

ReseauOz.m

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon Oz
%clear all;
close all;
n=8; % nombre d'antennes
teta0=93*pi/180; % Direction du lobe principal en radian
freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dz=0.7*lamda; % Espacement entre élément
phiZ=2*pi*(dz/lamda)*cos(teta0); % déphasage entre élément
teta=(0:0.1:180)*pi/180; % angle d'elevation en radian

PsiZ=-phiZ+2*pi*(dz/lamda)*cos(teta);
E=sin(n*PsiZ/2)./sin(PsiZ/2);
E=abs(E)/n;

%%%%%%%%%
figure(1)
plot(teta*180/pi,E);
axis([0 180 0 1]);
xlabel('teta (°)');
ylabel('diagramme en champ');
%%%%%%%%%
figure(2)
polar(teta,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
%%%%%%%%%
figure(3)
plot(teta*180/pi,20*log10(E));
axis([0 180 -40 0]);
xlabel('teta (°)');
ylabel('diagramme en champ (dB)');

```

Annexe2 : Code Matlab pour la simulation du diagramme de rayonnement produit par un alignement de sources isotropes selon Oy, équidistantes avec phase progressive

ReseauOy.m

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon Oy
%clear all;
close all;
n=8; % nombre d'antennes
phi0=31*pi/180; % Direction du lobe principal en radian
freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément
phiy=2*pi*(dy/lamda)*sin(phi0); % déphasage entre élément
phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

%%%%%%%%%
figure(1)
plot(phi*180/pi,E);
axis([-90 90 0 1]);
xlabel('phi (°)');
ylabel('diagramme en champ');
%%%%%%%%%
figure(2)
polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
figure(3)
plot(phi*180/pi,20*log10(E));
axis([-90 90 -40 0]);
xlabel('teta (°)');
ylabel('diagramme en champ (dB)');

```

Annexe3: Code Matlab pour la simulation de la répartition de puissance autour d'un réseau 2D bilinéaire d'antennes isotropes équidistantes avec phase progressive, situé à une hauteur h au dessus du sol.

Code Reseau2D.m

```

% Antenne Réseau Bi-linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon 0y
et selon 0z
% Détermination de la portée pour une antenne se trouvant à une hauteur h
par rapport au sol
%clear all;
close all;
n=8; % nombre d'antennes n=ny=nz
freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément selon y
dz=0.7*lamda; % Espacement entre élément selon z
h=50; % Position de l'antenne au dessus du sol en metres

phi0=31*pi/180; % Direction du lobe principal dans le plan horizontal= 31
degrés (Azimuth)
phiy=2*pi*(dy/lamda)*sin(phi0); % déphasage entre élément selon y

teta0=93*pi/180; % Direction du lobe principal en radian (élévation= 93
degrés)
phiz=2*pi*(dz/lamda)*cos(teta0); % déphasage entre élément selon z
%
xx=zeros(100,1);
yy=zeros(200,1);
P=zeros(100,200);

for i=1:100
    x=-9+10*i;
    xx(i)=x; % coordonnée du point d observation selon x
    for j=1:200
        y=-1000+10*j;
        ij=100*(i-1)+j;
        yy(j)=y; % coordonnée du point d observation selon y
        Psiz=-phiz-2*pi*(dz/lamda)*h/sqrt(h^2+x^2+y^2);
%
        Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*y/sqrt(h^2+x^2+y^2);%%
% S1=(sin(n*Psiy/2)/sin(Psiy/2)*sin(n*Psiz/2)/sin(Psiz/2))^2/(h^2+x^2+y^2);
        S1=(sin(n*Psiy/2)/sin(Psiy/2)*sin(n*Psiz/2)/sin(Psiz/2))^2/n^4;
        P(i,j)=S1/(h^2+x^2+y^2); % Puissance reçue au sol à un facteur
près (lamda/4/pi)^2*n^2
    end
end
%P=P*(lamda/4/pi)^2*n^2;
Pmax1=max(P);
Pmax=max(Pmax1);
P=P/Pmax;% Puissance reçue au sol normalisée
figure(1)
contourf(yy,xx,10*log10(P))
xlabel('y (en m)');
ylabel('x(en m)');
colorbar
hold on
plot(yy,sqrt(40000-yy.*yy),'-')
hold on
plot(yy,sqrt(160000-yy.*yy),'-')
hold on

```

```

plot(yy,sqrt(360000-yy.*yy),'-')
hold on
plot(yy,sqrt(640000-yy.*yy),'-')
hold on
plot(yy,sqrt(1000000-yy.*yy),'-')

```

Annexe 4 : Code Matlab pour la synthèse de faisceau par la méthode de Dolph Tchebychev

Code ReseauTchebychev8.m

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon 0y
%clear all;
close all;
n=8; % nombre d'antennes

freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément

phiy=22.5*pi/180; % déphasage entre élément
philL=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian
%Emax=0;
phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E1=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E1=abs(E1)/n;
E=abs(3.205*cos(Psiy/2)+2.812*cos(3*Psiy/2)+2.126*cos(5*Psiy/2)+1.864*cos(7
*Psiy/2));
Emax=max(E);
E=E/Emax;
figure(1)
plot(phi*180/pi,20*log10(E));
axis([-90 90 -40 0]);
xlabel('phi (°)');
ylabel('diagramme en champ (dB)');
hold on
plot(phi*180/pi,20*log10(E1));
%
figure(2)
polar(phi,E);
xlabel('phi (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
polar(phi,E1);

```

Annexe 5: Code Matlab pour la formation numérique de faisceau d'une antenne intelligente en maximisant le rapport Signal à Interférence

Code : Beamformer.m

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon 0y
% Formation numérique de faisceau en maximisant le Rapport Signal à
Interférence (SIR)
%clear all;
close all;
M=input(' nombre d antennes ');
freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément
%
Ns=input(' nombre de signaux recus sur le reseau ');
phi=zeros(Ns,1);
%phi(1)=25*pi/180; % direction du signal 1 indésiré
phi(1)=input(' direction du signal desire en degre ');
for i=2:Ns
phi(i)=input(' direction du signal non desire en degre ');
end
for i=1:Ns
phi(i)=phi(i)*pi/180;
end
%phi(2)=0*pi/180; % direction du signal 1 indésiré
%phi(3)=-45*pi/180; % direction du signal 2 indésiré
%
A=zeros(M,Ns);
Rdd=zeros(M); % Matrice de corrélation pour le signal désiré
%Rii=zeros(M); % Matrice de corrélation pour le signal non désiré
Aii=zeros(M,Ns-1);
sigmaN=0.01; % bruit blanc additif de variance sigmaN
for l=1:M
for is=1:Ns
psy=2*pi*dy/lamda*(l-1)*sin(phi(is));
A(l,is)=cos(psy)+sin(psy)*1i;
if (is>=2)
Aii(l,is-1)=A(l,is);
end
end
end
%
for il=1:M
for ic=1:M
Rdd(il,ic)=A(il,1)*conj(A(ic,1));
end
end
Rdd
%
Rii=Aii*Aii'+eye(M)*sigmaN
RiRd=Rii\Rdd
[V,D]=eig(RiRd);
V(:,1)
%
%phiy=22.5*pi/180; % déphasage entre élément
%philL=asin(phiy*lamda/(2*(pi*dy)))*pi/180 % Direction du lobe principal en
radian
E=zeros(1801,1);
teta=zeros(1801,1);
j=0;
for phii=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

```

```
j=j+1;
som=0;
    for m=1:M
Psiy=2*pi*dy/lamda*(m-1)*sin(phii);
%som=som+V(m,1)*exp(Psiy*1i);
som=som+conj(V(m,1))*(cos(Psiy)+sin(Psiy)*1i);
    end
E(j)=abs(som);
teta(j)=phii*180/pi;
end
E=E/max(E);
%
figure(1)
plot(teta,E);
axis([-90 90 0 1]);
xlabel('phi (°)');
ylabel('diagramme en champ ');
figure(2)
polar(teta*pi/180,E);
xlabel('phi (°)');
title('diagramme en champ');
```

Annexe 6 : Code Matlab pour la formation analogique de faisceau d'une antenne intelligente en utilisant la matrice de Butler

Code Matlab : Butler4.m pour un nombre d'antennes égal à 4

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon 0y
% Formation analogique de faisceau en utilisant la matrice de Butler
%clear all;
close all;
n=4; % nombre d'antennes

freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément

phiy=45*pi/180; % déphasage entre élément
phi1L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;
figure(1)
polar(phi,E);
%xlabel('teta (°)');
%title('diagramme en champ');
%plot(phi*180/pi,20*log10(E));
%axis([-90 90 -40 0]);
%xlabel('teta (°)');
%ylabel('diagramme en champ (dB)');
%legend('1L');
hold on
%%%%%%%%
phiy=135*pi/180; % déphasage entre élément

phi2L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian
phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;
polar(phi,E);
%plot(phi*180/pi,20*log10(E));
%axis([-90 90 -40 0]);
%xlabel('teta (°)');
%ylabel('diagramme en champ (dB)');
%legend('2L');
hold on
%%%%%%%%
%%%%%%%%
phiy=-45*pi/180; % déphasage entre élément

phi1R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

```

```

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;
polar(phi,E);
%
hold on
%%%%%%%%%
phiy=-135*pi/180; % déphasage entre élément

phi2R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian
phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;
polar(phi,E);
%%%%%%%%%

```

Code Matlab : Butler8.m pour un nombre d'antennes égal à 8

```

% Réseau linéaire equi-amplitude avec phase progressive selon 0y
%clear all;
close all;
n=8; % nombre d'antennes

freq=3.5e9; % Fréquence de travail
lamda=3.e8/freq; % Longueur d'onde
dy=0.5*lamda; % Espacement entre élément

phiy=22.5*pi/180; % déphasage entre élément
phi1L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*pi/180 % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;
figure(1)
polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=67.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi2L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian
phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

```

Annexes

```
polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=112.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi3L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=157.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi4L=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=-22.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi1R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=-67.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi2R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian
```

```

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=-112.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi3R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on
%%%%%%%%%
phiy=-157.5*pi/180; % déphasage entre élément

phi4R=asin(phiy*lamda/(2*pi*dy))*180/pi % Direction du lobe principal en
radian

phi=(-90:0.1:90)*pi/180; % angle azimutal en radian

Psiy=-phiy+2*pi*(dy/lamda)*sin(phi);
E=sin(n*Psiy/2)./sin(Psiy/2);
E=abs(E)/n;

polar(phi,E);
xlabel('teta (°)');
title('diagramme en champ');
hold on

```

