



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Télécommunications**

**Spécialité : Systèmes des Télécommunications**

### THEME

*Optimisation d'un réseau  
d'antennes par l'algorithme  
méta-heuristique API*

*Réalisé par : - DJEBAILI Mahmoud  
- LAOUAR Mohamed Lamine*

**Soutenu le 15 / 09 /2020** **Devant le jury composé de :**

**M<sup>me</sup>. MEDJALDI Malika**

**Président**

**Université Abbes Laghrou-Khenchela**

**M<sup>me</sup>. MAAMRI Fouzia**

**Encadreur**

**Université Abbes Laghrou-Khenchela**

**Mr. BOUMEHREZ Farouk**

**Examineur**

**Université Abbes Laghrou-Khenchela**

*Promotion 2019/2020*



## ملخص

في هذا العمل ، قمنا باقتراح خوارزمية مستعمرة النمل من نوع Pachycondyla apicalis API ، يعود هذا الأخير إلى التوازن الصحيح بين استغلال الحلول واستكشاف مساحة البحث ، وكذلك إلى العدد الصغير من عناصر الخوارزمية ، وهي عبارة عن طريقة تستعمل لحل مشاكل التحسين الصعبة. وتظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أهمية استخدام هذه الخوارزميات في حل هذا النوع من المشكلات بطريقة عامة وفعالة ( ايجاد حل مقبول وفق معايير محددة: الوقت، الاخطاء، .. الخ).يمثل التحسين الصعب فئة من المشكلات التي لا يمكن الحصول على حل لها بطريقة دقيقة في وقت متعدد الحدود. إيجاد حل في وقت معقول يتطلب حل مقبول بشأن دقته حيث قمنا بتقليد سلوك نوع من النمل API لغرض تنفيذ و اختبار الخوارزمية على شبكة الهوائيات. سمح لنا هذا العمل في التحكم بشبكة الهوائيات بطريقة مثلى، من وجهة نظر الاتجاهية و التقليل من الفص الثانوي.

**كلمات مفتاحية:** التحسين، الخوارزمية API، شبكة الهوائيات ، الاتجاهية، الفص الثانوي، مستعمرة النمل.

## **Abstract**

In this work, we have proposed the Pachycondyla apicalis ant colony algorithm, this due to the correct balance between exploiting solutions and exploring the search space, as well as to the small number of elements of the algorithm, which is a method used to solve difficult optimization problems. The obtained simulation results show the importance of using these algorithms in solving this type of problem in a general and effective way (finding an acceptable solution according to specific criteria: time, error, etc.). Difficult improvement represents a class of problems that cannot be solved accurately in a reasonable time. Finding a solution in a reasonable time requires an acceptable solution. In terms of its accuracy, we have used the behavior of a type of ant API for the purpose of implementing and testing the algorithm on the antennas.

This work allowed us to optimize the control of the antenna array, from the point of view of directivity and reduction of the secondary lobe.

**Keywords:** optimization, méta-heuristics API, antenna array, directivity , secondary lobe, Ant colony.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons proposé l'algorithme de colonie de fourmis *Pachycondyla apicalis*, ceci en raison du bon équilibre entre l'exploitation de solutions et l'exploration de l'espace de recherche, ainsi que du petit nombre d'éléments de l'algorithme, qui est une méthode utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation. Les résultats de simulation obtenus montrent l'importance d'utiliser ces algorithmes pour résoudre ce type de problème de manière générale et efficace (trouver une solution acceptable selon des critères précis: temps, erreur, etc.). Une amélioration difficile représente une classe de problèmes qui ne peuvent pas être résolus avec précision en un temps raisonnable. Trouver une solution dans un délai acceptable nécessite une solution acceptable. En termes de précision, nous avons imité le comportement d'un type d'API de fourmi dans le but de mettre en œuvre et de tester l'algorithme sur les antennes.

Ces travaux nous ont permis d'optimiser le contrôle du réseau d'antennes, du point de vue de la directivité et de la réduction du lobe secondaire.

**Motsclés** : optimisation, méta-heuristiques (API), réseau d'antennes, directivité, lobe secondaire, Colonie de fourmis.

# *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes très chers parents ;*

*A Ma famille*

*A Tous mes amis;*

*M. DJEBALI*

# ***DEDICACE***

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes très chers parents ;*

*A Ma famille*

*A Touts mes amis;*

*ML. LAOUR*

# REMERCIEMENT

*Nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur : Docteur **Maamri fouzia** Nous la remercions infiniment pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa patience, sa gentillesse, pour ses conseils précieuse.*

*Nous remercions également Docteur. **Medjaldi malika** pour avoir accepté de présider mon notre jury, Je suis également honoré par l'acceptation de Mr. **Boumehrez Farouk** de juger notre travail et qui je le remercie beaucoup.*

*Un grand remerciement à nos amis. Un merci particulier aux personnes qui nous ont soutenu et encouragé.*

# *Sommaire*

Dédicaces

Remerciements

Listes des figures

Glossaire

**Introduction générale..... 1**

## **Chapitre I : Généralités sur les antennes**

I.1-Introduction..... 3

I.2- Historique..... 4

I.3-Les antennes..... 4

I.3.01-Antenne d'émission..... 5

I. 3.02- Antenne de réception..... 5

I. 3.03-Caractéristique d'une antenne..... 5

I.4-Puissance rayonnée par une antenne..... 6

I.4.1-Réciprocité..... 7

I. 4.2-Principe de rayonnement..... 7

I.4.3- Diagramme de rayonnement..... 8

I.4.4- Puissance rayonnée..... 10

I.5-Directivité..... 11

I.5.1-Définition..... 11

I.6-Gain d'une antenne..... 11

I.7- Les réseaux d'antenne..... 12

I.7.1-Présentation du concept..... 14

I.8- Analyse d'une antenne..... 14

I.8.2- Etude d'un réseau à 2 éléments non isotropes..... 15

I.8.3-Etude d'un réseau linéaire à n éléments régulièrement espacés.... 16

I.8.4-Analyse du rayonnement en trois dimensions..... 22

I.8.5 -Analyse d'un réseau plan.....	23
I.8.6- Prise en compte de l'alimentation.....	24
I.8.7- Evolution de la directivité.....	24
I.8.7.1 Evolution de la directivité en fonction de la distance entre éléments .....	25
I.8.8 -Le pointage électronique.....	26
I.8.9 -Abaissement des lobes secondaires.....	28

## **Chapitre II :Les algorithmes méta-heuristiques**

II.1 – Introduction.....	30
II.2 - Les problèmes d'optimisation.....	30
II.3 - Les éléments d'optimisation.....	31
II.4 - L'optimisation combinatoire.....	32
II.5 - La démarche heuristique.....	33
II.6 - Les méta-heuristiques.....	33
II.6.1- Organisation générale.....	35
II.6. – Applications.....	36
II.6.3 - Méta- heuristique à recuit simulé.....	36
II.6.4 - Les méta- heuristiques évolutionnaires (génétiques).....	36
II.6.5 - Les méta- heuristiques éthologiques (colonies de fourmis).....	36
II.6.5.1 - Colonies de fourmis.....	37
II.6.5.2 - Les pistes de phéromones.....	37
II.7 - L' API.....	38
II.7.1 - Modélisation algorithmique.....	41
II.7.2 - Comportement local des fourmis.....	43
II.7.2.1 - Exploration globale.....	44
II.8- Conclusion.....	46

## **Chapitre III : Optimisation par algorithme API**

III.1-Introduction.....	48
III.2-Théorie de la méthode de synthèse.....	48
III.3-Synthèse à partir d'un gabarit.....	49

III.4-Application de l'algorithme API.....	49
III.5-Conclusion.....	56
Conclusion Générale.....	58
Bibliographie.....	60

# Liste des Figures

Figure I.1 : Historique des radiocommunications.....	5
Figure I.2 : schéma générale d'antenne.....	6
Figure I.3: Mécanismes de rayonnement.....	8
Figure I.4: Angle et angle solide.....	10
Figure I.5: Forme d'un diagramme de rayonnement tracé en coordonnées polaires.....	11
Figure I.6: Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes.....	14
Figure I.7: Représentation des deux antennes au rayonnement.....	15
Isotrope et du point d'observation P	
Figure I.8: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2éléments en fonction de la distance entre éléments, dans le plan du réseau.....	18
Figure I.9: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2éléments en fonction de $\theta$ , dans le plan du réseau.....	19
Figure I.10: Réseau aligné de n éléments régulièrement espacés.....	20
Figure I.11: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2éléments en fonction du nombre d'éléments.....	20
Figure I.12: facteur de réseau pour un réseau composé de 8 éléments.	21
Figure I.13: Rayonnement en $\cos(\theta)$ (vert), 16 antennes isotropes (rose), 16 antennes en $\cos(\theta)$ (bleu).....	22
Figure I.14: Représentation d'un réseau plan.....	24
Figure I.15: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2éléments en fonction de $\theta$ , dans le plan du réseau.....	27
<b>Liste des figures Chapitre II</b>	
Figure II.1 : Eléments indispensable d'optimisation.....	31

Figure II.2 : Comportement d'une fourmi naturelle lors de la recherche de nourriture .....	36
Figure II.3 : Le chemin entre le nid et la nourriture. ....	37
Figure II.4 : représente les aires de fourragement d'une colonie <i>Pachycondylaapicalis</i> .....	40
Figure II.5: Exploration des sites de chasse.....	43
Figure II.6: Le comportement de fourragement d'une fourmi.....	44
Figure II.7: Exploration globale : Déplacement du nid.....	44

### **Liste des figures chapitre III**

FigureIII.1: Demi-gabarit centré caractérisant le diagramme désiré.....	48
FigureIII.2: Méthode de l'optimisation par l'algorithme metaheuristique API Résultats de simulation.....	49
Figure III.3:Evolution de la directivité en fonction du déphasage $\Psi(N=16, d =0.0137)$ .....	50
Figure III.3 : Evolution de la directivité en fonction du déphasage $\Psi(N=16, d =0.0137)$ .....	51
Figure III.4 : Evolution de la directivité en fonction de la distance $d$ ( $d=0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda$ et $\lambda$ ) entre deux éléments adjacents ( $N=4, \Psi=0$ ).....	52
Figure III.5 : Evolution de la directivité en fonction de la distance $d$ entre deux éléments adjacents ( $N=16, \Psi=0$ ).....	53
Figure III.6 : La valeur de la distance 'd' en utilisant l'algorithme API $N=16, \lambda=0.0566$ m et $\Psi=0$ .....	56
Figure III.7 : La valeur de la distance 'd' en utilisant l'algorithme API $N=16, \lambda=0.0566$ m et $\Psi=2.3$ .....	57

<b>API</b>	Apicalis Pachycondyla Identification
<b>AS</b>	Ant System

## Paramètres utilisés

<b>E</b>	champ électrique
<b>F</b>	facteur de réseau
<b>D</b>	directivité
<b><math>\Psi</math></b>	déphasage
<b>N</b>	nombre des éléments rayonnants
<b>d</b>	distance entre éléments rayonnants
<b><math>\lambda</math></b>	longueur d'onde
<b>n</b>	nombre fourmis fourrageuses
<b>S</b>	l'espace de recherche
<b>S</b>	une solution valide du problème
<b><math>a_i</math></b>	fourmi numéraux $i$
<b>F<sub>obj</sub></b>	fonction objective

---

# *Introduction générale*

---

## Introduction générale

Le développement des réseaux d'antennes s'accompagne d'avancées technologiques au niveau des composants électroniques, des logiciels informatiques, des techniques d'optimisation ou encore des antennes.

La directivité et le diagramme de rayonnement visent à concentrer et l'énergie seulement dans les directions souhaitables. Au contraire dans les systèmes d'antennes traditionnels, les transmissions omnidirectionnelles de radio fréquence (RF) sont soumises aux interférences, ce qui donne une qualité plutôt médiocre. En effet, ce type de couverture est nécessaire car l'emplacement de l'utilisateur est inconnu. Ce type de transmission a pour conséquence d'envoyer la puissance dans des directions inutiles. Donc il est devenu nécessaire de rechercher des solutions pour améliorer les performances des antennes. Parmi les solutions disponibles qui ont connu un grand succès nous citons les méta-heuristique, il s'agit de principes algorithmiques permettant d'obtenir une solution en respectant certains principes de construction.

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents.

L'objectif de notre travail consiste à optimiser l'emplacement d'un réseau d'antennes par des méta-heuristiques inspirés du comportement des fourmis dans la nature. Cette optimisation se traduit par trouver des caractéristiques optimales d'un réseau d'antenne.

Pour mener à bien notre travail nous avons élaboré le plan suivant le :

Le premier chapitre: présentera les différents types d'antennes et leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre: nous donnerons des généralités sur l'optimisation et leur classification, nous présentons également les méta-heuristiques, qui sont des méthodes permettant d'obtenir une valeur approchée de la solution optimale en un temps raisonnable, et nous focaliserons sur l'algorithme Pachycondyla Apicalis API.

Le troisième chapitre est réservé pour l'évaluation de l'algorithme API en optimisation d'un réseau d'antenne.

---

*Chapitre I*  
*Généralités sur les antennes*

---

## **I.1. Introduction**

Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés. L'essor actuel des communications impose des innovations importantes au niveau de la conception des systèmes et des antennes associées, dont les formes aujourd'hui très diverses varient beaucoup selon les utilisations : télécommunications mobiles, satellites, télévision, radio, identification, objets communicants [1].

Malgré cette grande diversité, toutes les antennes ont en commun de transformer un signal guidé en un signal rayonnant (ou réciproquement), dans un spectre électromagnétique relativement large allant des ondes radio aux hyperfréquences. Un principe fondamental régit leur rayonnement, celui de la diffraction des ondes. Actuellement, la course à l'innovation concernant les systèmes de communication entraîne des études poussées dans le domaine des antennes. Dans ce contexte, les méthodes de conception, de mesures et de modélisation constituent une aide considérable. De nombreuses équipes contribuent à ce développement. Cet ouvrage a pour objectif de fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement des antennes. Nous proposons successivement [2] :

- Des bases théoriques sur le fonctionnement des antennes.
- Un classement des nombreux types d'antennes existants en précisant, d'une part leurs caractéristiques à partir d'une modélisation, et d'autre part leurs utilisations dans les systèmes [3].
- Des éléments de conception applicables à chaque type. Ceux-ci sont complétés par des principes de mesure et de simulation numérique.

Donc Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement). Une définition traditionnelle est la suivante : « Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une Antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur[4].

## I.2- Historique

Le développement des radiocommunications est basé sur la Théorie de l'électromagnétisme, mise au point au XIXe siècle et améliorée au XXe siècle. Les ondes électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévues de manière théorique dans le cadre des équations de Maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz à la fin du XIXe siècle. Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparues. Leur développement s'est fait en parallèle avec celui de l'électronique au début du siècle. Le XXe siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient à des besoins précis[2].



Figure I.1: Historique des radiocommunications

## I.3-Les antennes

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace, ou pour le capter. Il existe de nombreux types d'antennes, important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, en plus, à classer les antennes par rapport à leur principe de fonctionnement et par rapport à leur rôle dans les systèmes. Les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle, à une époque où les travaux sur l'électromagnétisme ont connu un développement considérable. Depuis, leur réalisation n'a cessé d'évoluer, d'abord, grâce

aux progrès scientifiques de l'électromagnétisme, plus tard, sous la pression de nombreuses demandes technologiques dans des domaines d'application variés[2]

### I.3.1-Antenne d'émission

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur[3].

### I.3.2- Antenne de réception

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme [3].

### I.3.3-Caractéristique d'une antenne

Les antennes émettrices. Cependant, il est nécessaire de supprimer toute distinction entre antenne émettrice et antenne réceptrice, en introduisant le principe de réciprocité : toute structure qui reçoit une onde électromagnétique peut transmettre une onde électromagnétique. Une antenne passive peut réciproquement être utilisée en émission et en réception. Les propriétés de l'antenne resteront les mêmes qu'elle soit utilisée en émission ou en réception. La figure 03 présente la structure générale d'une antenne émettrice. (Une antenne réceptrice présente une structure similaire, l'alimentation est remplacée par un récepteur, le sens des flèches indiquant le transfert de puissance est inversé) :[9]

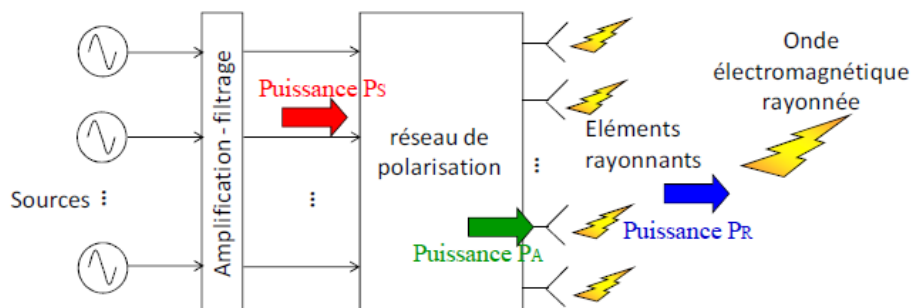


Figure I.2: Schéma générale d'antenne

Quel que soit la fréquence de fonctionnement de l'antenne, quel que soit sa structure physique, le rayonnement des antennes est caractérisé par des propriétés communes. Le but de ce chapitre est de les présenter. Ces propriétés doivent permettre de répondre aux questions suivantes:

- \_ Comment une antenne rayonne-elle la puissance qui lui est fournie dans l'espace ? Dans quelle(s) direction(s) ?
- \_ Avec quelle efficacité se fait le transfert d'énergie entre la puissance de l'émetteur et la puissance rayonnée ?
- \_ Sur quelle bande de fréquence l'antenne rayonne de manière optimale ?
- \_ Quelles sont les propriétés données par l'antenne à l'onde électromagnétique émise ?[5]

## **I.4-Puissance rayonnée par une antenne**

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace. Les directions dans lesquelles cette puissance va dépendre des caractéristiques de l'antenne. Commençons par exprimer la puissance rayonnée par une antenne quelconque, dont le centre est placé au centre d'un repère sphérique. Et connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique PA. La puissance rayonnée dans une direction quelconque ( $\theta, \varphi$ ) dans un angle solide (exprimé en stéradian sr) est donnée par l'équation. La puissance fournie à une surface élémentaire située à une distance R est donnée par l'équation. La puissance rayonnée totale correspond à la somme des puissances rayonnées dans toutes les directions de l'espace[11].

### **I.4.1-Réciprocité**

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est une conséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le Rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart descas[6]

### **I.4.2-Principe de rayonnement**

Deux points importants :

- a- la plupart des antennes sont métalliques
- b- la grande majorité est de type antennes résonantes

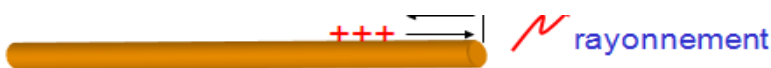
Dans un métal, les électrons libres se déplacent par défaut de façon erratique. Quand on crée une différence de potentiel (sinusoïdale par exemple), le champ interne commande alors la répartition de ces charges.

Les courants et charges créés sont alors autant de sources élémentaires de champ électromagnétique. Mais selon leur répartition et leurs phases relatives, le champ global délivré par un élément métallique est la somme de toutes les contributions de ces sources élémentaires [1]. Des charges transitant sur un métal droit à vitesse constante ne produisent pas de rayonnement. Si les charges rencontrent une discontinuité (rupture, courbure...) leur vitesse change, il y a alors rayonnement. Dans une structure en résonance, les charges oscillent en permanence, créant un flux de rayonnement continu.

**a. Pas de rayonnement**



**b. Rayonnement**



**c. Rayonnement**



Figure I.3: Mécanismes de rayonnement

**I.4.3- Diagramme de rayonnement**

C'est la coupe par un plan de la surface caractéristique. Dans le cas où notre antenne rayonne de la même façon dans toutes les directions (cas d'une antenne isotrope ou omnidirectionnel), le diagramme de rayonnement sera un cercle[7].

**a-Cylindriques**

- une hauteur, un rayon, un site  $Z, r, \theta) \Rightarrow dz, dr, rd\theta$

**b-Sphériques**

- un rayon, un site, un gisement :  $(r, \theta, \varphi) \Rightarrow dr, rd\theta r \sin\theta d\varphi$

**c-Polaires**

- un rayon, un site :  $(r, \theta) \Rightarrow dr, d\theta$

On adoptera les coordonnées sphériques de telle sorte qu'à partir de l'origine 0, choisit comme point source, on définira n'importe quel point de l'espace par:

\_ r : sa distance à la source

\_  $\theta$  : son site, définissant sa direction  $\Delta(\theta)$

\_  $\varphi$  : son gisement.

**d- plan horizontal**

Angle sous lequel est vu un arc de cercle

$$\Delta\alpha = \frac{dl}{R} \quad \text{I.1}$$

Angle solide sous lequel est vue une calotte  $\Delta\Omega$  sphérique de surface "ds".

$$\Delta\Omega = \frac{ds}{R^2} \quad \text{I.2}$$

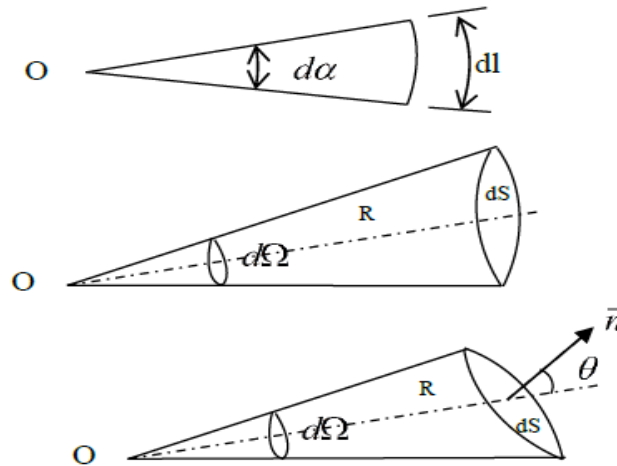


Figure I.4: Angle et angle solide

La totalité de la sphère est vue sous un angle[5] :

$$\int_0^\Omega d\Omega = \Omega = \frac{1}{R^2} \int_{\text{sphere}} ds = \frac{1}{R^2} 4\pi R^2 = 4\pi \quad \text{I.3}$$

Dans le cas où ds ne serait pas normale au rayon de la sphère, on prend sa projection ds' sur le plan normal telle que:[5]

$$ds' = ds \cos\theta \quad \text{I.4}$$

#### I.4.4-Puissance rayonnée

Si l'antenne est une source isotropique (fictive et omnidirectionnelle), la puissance qu'elle rayonne est uniformément répartie autour d'elle sur une sphère de rayon R[6].

$$P = \frac{p}{4\pi R^2} \quad \text{I.5}$$

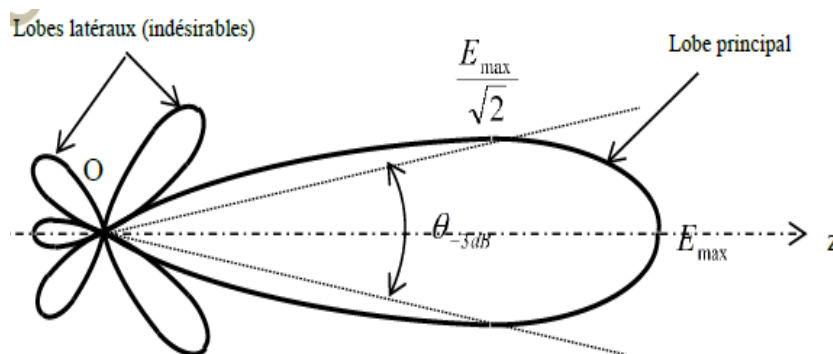
Elle correspond à une densité de puissance puisque c'est une répartition par unité de surface. La puissance rayonnée par unité d'angle solide sera:

$$P = \frac{p}{4\pi} 1.6$$

Il représente les lieux géométriques des puissances de rayonnement.

- La valeur maximale de ce rapport est 1.
- Ses variations caractérisent la façon dont l'énergie rayonnée par l'antenne se répartie dans l'espace.
- Ses variations sont fonction de  $\theta$  et  $\varphi$  et sont indépendantes de la distance à laquelle sont effectuées les mesures.

Les systèmes rayonnants sont conçus de façon à concentrer l'énergie dans une Direction déterminée; c'est la directivité.



**Figure I.5: Forme d'un diagramme de rayonnement tracé en coordonnées polaires**

La majeure quantité de cette énergie est localisée dans la partie principale du diagramme de rayonnement; c'est le lobe principal du rayonnement. Elle représente l'énergie utile qu'il faut optimiser[1].

Le reste est réparti à travers l'autre partie du diagramme de rayonnement. Ce sont les lobes secondaires ou latéraux du rayonnement dont il faut chercher à minimiser le nombre et les amplitudes pour éviter des rayonnements dans des directions indésirables.

Si les lobes secondaires sont suffisamment faibles, la presque quasi-totalité de la puissance rayonnée est contenue entre les directions correspondant au rayonnement à demi puissance ou à -3dB.

Ces directions limiteront la largeur du lobe principale à une valeur appelée ouverture à - 3dB du diagramme de rayonnement. C'est l'angle  $\theta=-3\text{dB}$  qui exprime la directivité de l'aérien.

Elle exprime le rapport de l'intensité de rayonnement dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  à la valeur moyenne de l'intensité de rayonnement pour toutes les directions de l'espace).

$$D = \frac{U(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi \iint U(\theta, \varphi) d\Omega}} = \frac{dPr/d\Omega}{Pr/4\pi} \quad \text{I.7}$$

Le rendement étant défini par:

$$n = \frac{Pr}{Pa} \quad \text{I.8}$$

Il est facile de voir que

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \quad \text{I.9}$$

## I.5-Directivité

### I.5.1-Définition

On parle d'une antenne plus ou moins directive. Afin de quantifier cette propriété la notion de directivité a été introduite. La directivité dans une direction est le rapport entre la valeur de la fonction caractéristique de rayonnement dans cette direction à sa valeur moyenne dans tout l'espace[9].

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

Une valeur faible pour la moyenne de la fonction caractéristique de rayonnement, correspond à une antenne directive : la puissance n'est envoyée que dans un cône d'angle solide petit. Dans ce cas, d'après la définition, la valeur moyenne étant au dénominateur entraîne une valeur élevée de la directivité [10].

La directivité dans une direction permet de comparer la densité de puissance rayonnée dans cette direction à la puissance moyenne rayonnée dans l'espace.

La directivité étant égale à un rapport de puissances, peut être exprimée soit sur une échelle linéaire, soit sur une échelle logarithmique. Dans ce dernier cas, elle s'exprime en décibel (dB), comme dix fois son logarithme en base dix.

Remarquons que la directivité peut être inférieure ou supérieure à 1 sur une échelle linéaire, ou bien positive ou négative sur une échelle logarithmique.

Le maximum de directivité est obtenu dans la direction de l'axe de l'antenne, lorsque la fonction caractéristique normalisée est égale à 1 [10].

## I.6-Gain d'une antenne

Soit  $P_t$  la puissance d'alimentation d'une antenne. Cette puissance est transformée en une puissance rayonnée  $P_0$ . Dans le sens de l'émission, la puissance rayonnée est inférieure à la puissance d'alimentation. L'antenne est un transformateur imparfait. Il y a des pertes lors de la transformation d'énergie, comme dans tout système. L'efficacité de l'antenne est définie par [11]:

$$\eta_1 = \frac{P_0}{P_t} \text{ telle que } \eta_1 \leq 1 \quad \text{I.11}$$

À la réception, la transformation a lieu en sens inverse. La puissance  $P_r$  reçue sur le récepteur est inférieure à la puissance  $P_0$  rayonnée arrivant sur l'antenne.

Le gain dans une direction est défini par le rapport de la densité de puissance rayonnée dans une direction à la densité de puissance  $S_{r_i}$  qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes, les deux antennes étant alimentées par la même puissance et placées à la même position.

$$G(\theta, \varphi) = \frac{S_r(\theta, \varphi)}{S_{r_i}} \quad \text{I.12}$$

## I.7-Les réseaux d'antenne

Généralement, une source rayonnante unique, même de structure compliquée, ne permet pas toujours d'obtenir le diagramme de rayonnement désiré. En outre, ce diagramme est fixé par la structure de la source et ne peut pas être facilement ou rapidement modifié [12].

Or, il est possible de s'affranchir de ces deux restrictions, au moins partiellement, en groupant convenablement des sources rayonnantes.

En agissant sur l'un des paramètres de ce groupement d'antennes, tels que les amplitudes et/ou les phases des tensions d'alimentation des éléments, on peut facilement modifier le diagramme pour :

- Augmenter la directivité.
- Obtenir des diagrammes de rayonnement très proches du diagramme optimal désiré.
- Changer quasi instantanément la forme du faisceau.
- Augmenter le rapport signal à interférence et bruit (SINR) pour réduire, significativement, les rayonnements parasites dans certaines directions choisies.

L'utilisation des réseaux d'antennes devient ainsi indispensable dans certains domaines d'application tels que l'aviation, le radar, les systèmes de télécommunications mobiles etc.

### I.7.1-Présentation du concept

L'idée est de combiner le rayonnement de plusieurs éléments rayonnants afin d'accroître le rayonnement de l'antenne dans une ou plusieurs directions données, comme le montre la figure (4). En d'autres termes, il s'agit de créer une interférence constructive entre les ondes électromagnétique issues de différentes sources. La combinaison de ces différentes ondes va dépendre de la disposition et de la séparation entre les éléments rayonnants, ainsi que des propriétés en amplitude et en phase de l'excitation. Le réseau d'antennes comprend les différents éléments rayonnants ainsi que les structures permettant de modifier l'excitation de chaque élément rayonnant. Les éléments peuvent être quelconques : dipôles, patches, fentes rayonnantes. L'unique condition est que la mise en réseau de ces éléments ne modifie pas leurs caractéristiques propres. Par rapport aux éléments rayonnants, le gain et l'angle d'ouverture du réseau d'antenne seront donc modifiés.

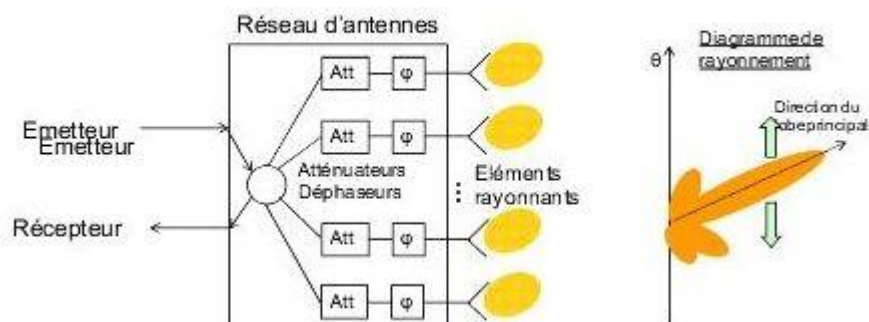


Figure I.6: Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes

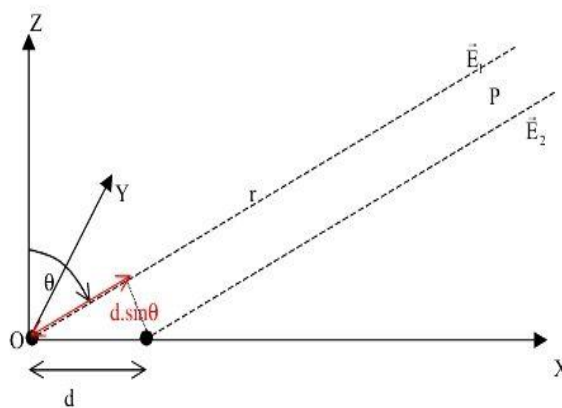
## I.8- Analyse d'une antenne

Afin d'appréhender « l'effet réseau », nous allons considérer une antenne au rayonnement isotrope : une telle antenne n'a pas de réalité physique, sa seule vertu est de permettre une évaluation immédiate des modifications qui sont susceptibles d'intervenir sur son diagramme de rayonnement.

### I.8.1-Etude d'un réseau à 2 éléments isotropes

Nous considérons deux antennes identiques au rayonnement isotrope. Nous allons partir de la situation initiale où ces deux antennes sont superposées à l'origine : il est alors évident que le diagramme de rayonnement est omnidirectionnel et identique à celui d'une seule antenne[10-12]

Nous allons ensuite laisser une antenne à l'origine et éloigner progressivement la deuxième antenne en la positionnant à une distance  $d$  de l'origine sur l'axe des  $x$  Figure (5). Nous pourrions alors observer progressivement la déformation du diagramme de rayonnement global lorsque l'on écarte les deux antennes.



**Figure I.7: Représentation des deux antennes au rayonnement Isotrope et du point d'observation P**

L'antenne située à l'origine rayonne au point P situé dans le plan  $y = 0$  un champ électrique que l'on peut modéliser par la relation[1] :

$$\vec{E}_1(P) = \alpha \frac{e^{-jKr}}{r} \vec{e}_p \quad I.13$$

Dans laquelle  $\alpha$  est une constante et  $\vec{e}_p$  le vecteur qui porte la polarisation au point P. L'antenne située sur l'axe des x, à la distance d de l'origine rayonne au point P. Un champ un champ électrique que l'on peut modéliser par la relation [45] :

$$\vec{E}(\mathbf{P}) = \alpha \frac{e^{-jK(r-d \sin\theta)}}{r-d \sin\theta} \vec{e}_p \quad \text{I.14}$$

Suivant les approximations classiques du champ lointain, on peut négliger la distance  $d \cdot \sin(\theta)$  sur le terme d'amplitude du champ, mais non sur sa phase.

Le champ total au point P s'obtient en sommant les deux contributions précédentes [1] :

$$\vec{E}(\mathbf{P}) = \alpha \left\{ \frac{e^{-jKr}}{r} + \frac{e^{-jK(r-d \sin\theta)}}{r} \right\} \vec{e}_p = \alpha \frac{e^{-jKr}}{r} \vec{e}_p \{1 + e^{jkd \sin\theta}\} \quad \text{I.15}$$

Et l'observation des relations (12) et (14) montre que la modification introduite par la deuxième antenne à la distance d de la première, dans le plan  $y = 0$ , est donnée par le terme entre accolades de la relation (14)[47] :

$$1 + e^{jKd \sin\theta} = e^{(jKd \sin\theta)/2} \left\{ e^{-\frac{(jKd \sin\theta)}{2}} + e^{\frac{(jKd \sin\theta)}{2}} \right\} = 2e^{\frac{(jKd \sin\theta)}{2}} \cos\left\{\frac{Kd \sin\theta}{2}\right\} \quad \text{I.16}$$

Ce terme exprimé de différentes manières dans l'expression (15) est appelé Facteur de réseau. Il traduit la modification apportée au diagramme de rayonnement d'une antenne seule lorsqu'elle est mise en réseau avec une deuxième[1].

Le champ total rayonné s'exprime alors sous la forme :

$$\vec{E}(\mathbf{P}) = 2\alpha \frac{e^{-jKr}}{r} e^{\frac{(jKd \sin\theta)}{2}} \cos\left(\frac{Kd \sin\theta}{2}\right) \vec{e}_p \quad \text{I.17}$$

Et le diagramme de rayonnement correspondant dans le plan  $y = 0$  s'écrit, à une distance donnée r et en prenant le module de (16) [10] :

$$E(\theta) = \left| \cos\left(\frac{Kd \sin\theta}{2}\right) \right| \quad \text{I.18}$$

**I.8.2- Etude d'un réseau à 2 éléments non isotropes**

Lorsque les éléments des réseaux sont des antennes réelles, leur rayonnement dans le plan du réseau peut être décrit par une fonction  $E(\theta)$ .

Le rayonnement des deux sources en champ lointain peut alors être modélisé par les relations [9]

$$\vec{E}_1(p) = E(\theta) \frac{e^{-jKr}}{r} \vec{e}_p \text{ et } \vec{E}_2(p) = E(\theta) \frac{e^{-jK(r-d \sin\theta)}}{r-d \sin\theta} \vec{e}_p \quad \text{I.19}$$

Un raisonnement analogue au précédent conduit au champ total rayonné par les deux sources, dans le plan du réseau [51] :

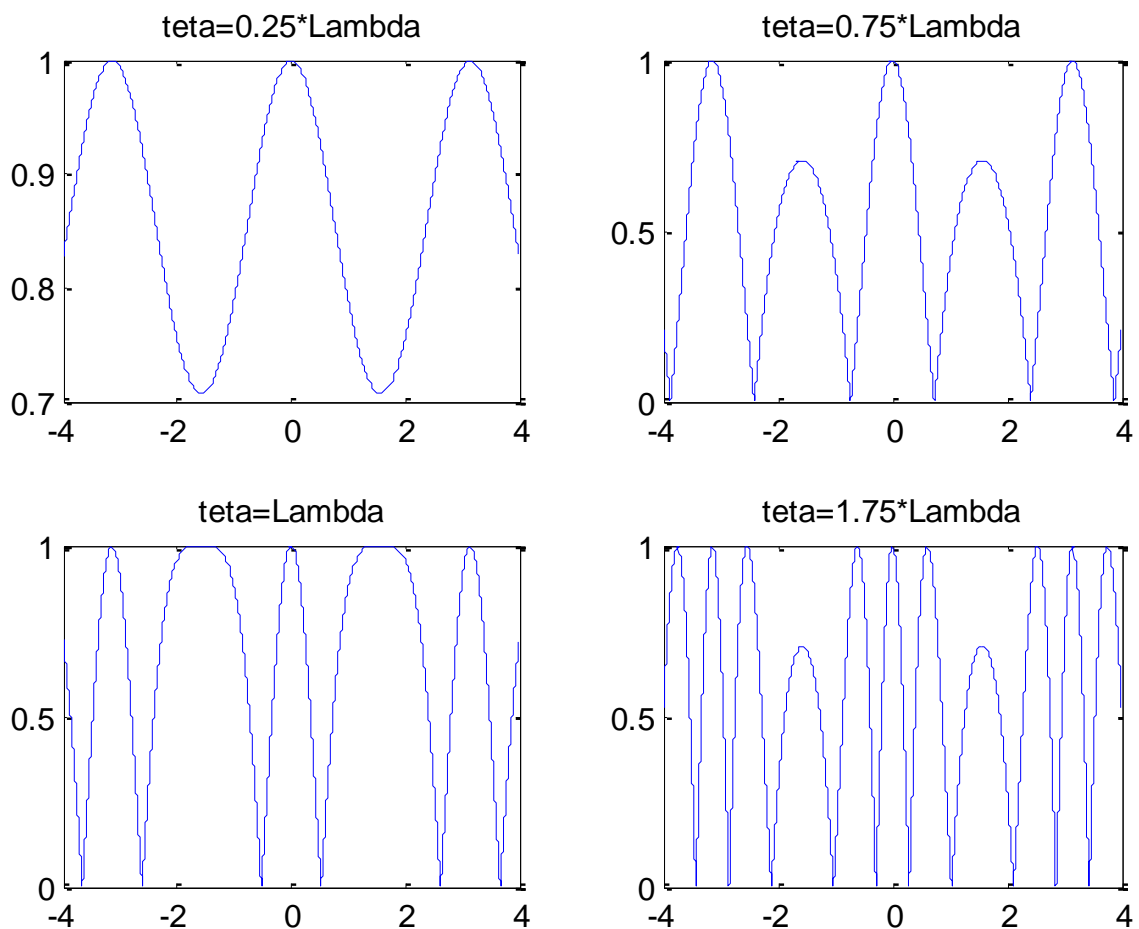
$$\vec{E}(p) = \left\{ 2e^{\frac{jKd \sin\theta}{2}} \cos\left(\frac{Kd \sin\theta}{2}\right) \right\} \left\{ (\theta) \frac{e^{-jKr}}{r} \vec{e}_p \right\} \quad \text{I.20}$$

On en déduit une propriété générale des réseaux linéaires : Le champ total rayonné par un réseau d'éléments identiques est égal au produit du champ rayonné par un élément du réseau par le facteur de réseau : ce sont les deux termes entre accolade de l'expression [8][9].

Et le diagramme de rayonnement correspondant dans le plan  $y = 0$  s'écrit, à une distance donnée  $r$  et en prenant le module de (20) :

$$E(\theta) = \left| \cos\left(\frac{Kd \sin\theta}{2}\right) \right| \quad \text{I.21}$$

L'évolution de ce diagramme en fonction de la distance  $d$  est représentée par la figure suivante :



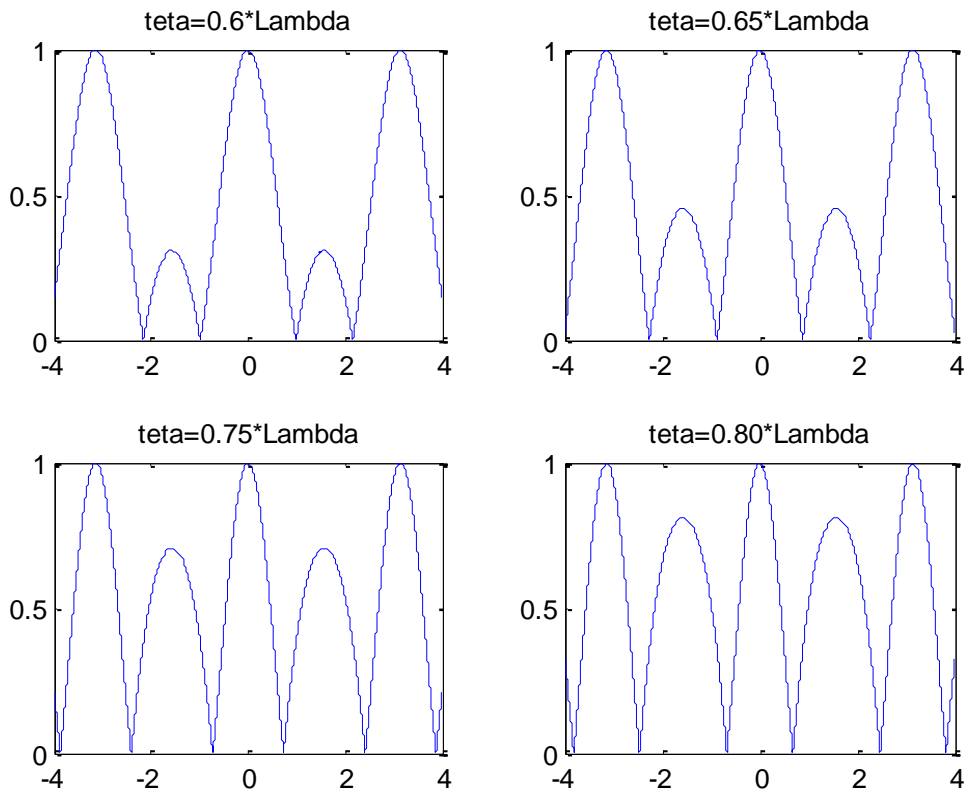
**Figure I.8: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2 éléments en fonction de la distance entre éléments, dans le plan du réseau.**

Les principales observations sur cette évolution sont les suivantes :

- Jusqu'à une distance  $d = \lambda/2$ , il n'y a qu'un seul lobe de réseau qui devient de plus en plus directif au fur et à mesure que  $d$  augmente.
- Pour  $\lambda/2 < d < \lambda$ , il y a apparition de deux lobes latéraux, dont le maximum est croissant avec  $d$ .
- Pour  $\lambda < d < 2\lambda$ , il y a 3 lobes de rayonnement maximum, avec apparition progressive de 2 lobes de rayonnement latéraux.

On déduit de ces remarques que la distance entre éléments sera en général choisie entre  $\lambda/2$  et  $\lambda$ .

- La recherche d'une directivité maximum, qui a lieu aux environs de  $d = 0.75\lambda$



**Figure I.9: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2éléments en fonction de  $\theta$ , dans le plan du réseau.**

Le diagramme de rayonnement du facteur de réseau s'écrit donc dans le plan  $y=0$  :

$$F(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{nKd \sin\theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Kd \sin\theta}{2}\right)} \right| \quad \text{I.22}$$

### I.8.3-Etude d'un réseau linéaire à n éléments régulièrement espacés

Nous disposons maintenant des outils pour décrire le rayonnement de n sources alignées suivant un axe que nous choisirons porté par OX Figure(5) :

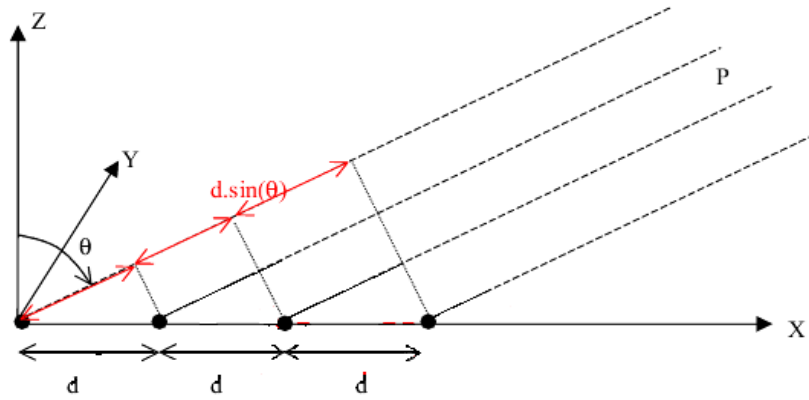
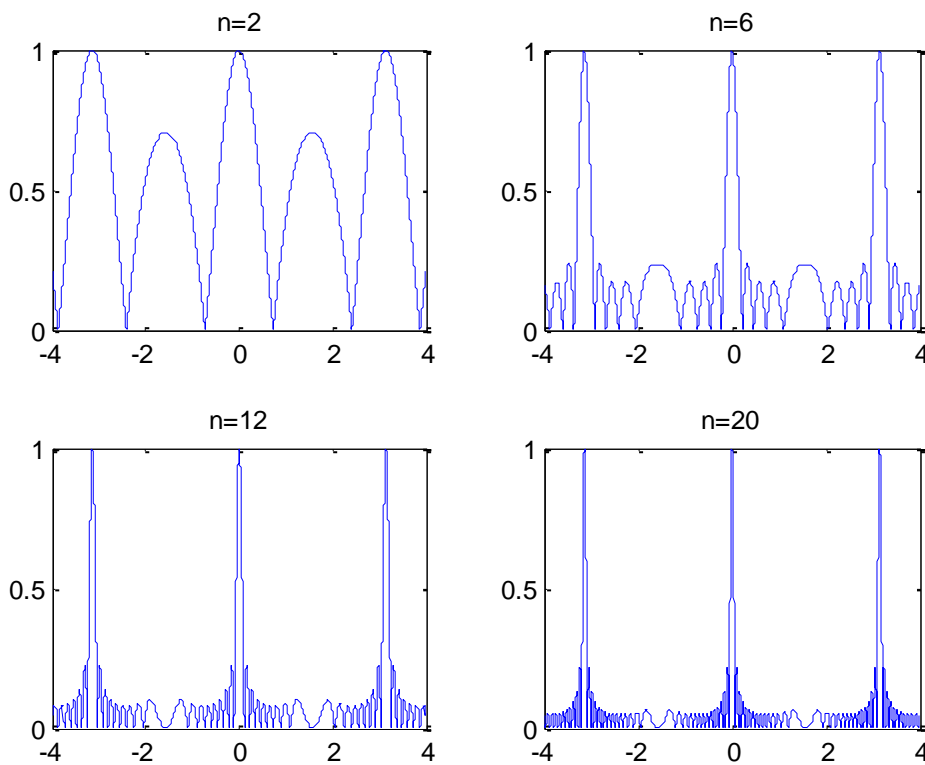


Figure I.10: Réseau aligné de  $n$  éléments régulièrement espacés

Les figures suivantes présentent le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes pour différentes valeurs de  $N$ .



$$d = 0.75 * \lambda$$

Figure I.11: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2 éléments en fonction du nombre d'éléments.

Le facteur de réseau devient de plus en plus directif au fur et à mesure que le nombre d'éléments augmente.

Le facteur de réseau dans le plan du réseau se construit par un raisonnement analogue précédent :

$$F = 1 + e^{jKd \sin \theta} + e^{2jKd \sin \theta} + e^{3jKd \sin \theta} + \dots + e^{(n-1)jKd \sin \theta} \quad \text{I.23}$$

On reconnaît dans l'expression (20) une progression géométrique de raison  $e^{jKd \sin \theta}$ , dont on sait évaluer la somme :

$$F = \frac{1 - e^{jKnd \sin \theta}}{1 - e^{jKd \sin \theta}} = \frac{e^{\frac{jnKd \sin \theta}{2}} e^{-\frac{jnKd \sin \theta}{2}} - e^{\frac{jnKd \sin \theta}{2}} e^{-\frac{jnKd \sin \theta}{2}}}{e^{\frac{jKd \sin \theta}{2}} e^{-\frac{jKd \sin \theta}{2}} - e^{\frac{jKd \sin \theta}{2}} e^{-\frac{jKd \sin \theta}{2}}} = \frac{e^{\frac{jnKd \sin \theta}{2}} \sin\left(\frac{nKd \sin \theta}{2}\right)}{e^{\frac{jKd \sin \theta}{2}} \sin\left(\frac{Kd \sin \theta}{2}\right)} \quad \text{I.24}$$

D'où l'expression du champ rayonné dans le plan  $y = 0$  :

$$\vec{E}(\mathbf{p}) = \left\{ \frac{e^{\frac{jnKd \sin \theta}{2}} \sin\left(\frac{nKd \sin \theta}{2}\right)}{e^{\frac{jKd \sin \theta}{2}} \sin\left(\frac{Kd \sin \theta}{2}\right)} \right\} \left\{ E(\theta) \frac{e^{-jKr}}{r} \vec{e}_p \right\} \quad \text{I.25}$$

Le diagramme de rayonnement du facteur de réseau s'écrit donc dans le plan  $y=0$  :

$$F(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{nKd \sin \theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Kd \sin \theta}{2}\right)} \right| \quad \text{I.26}$$

Le facteur de réseau devient de plus en plus directif au fur et à mesure que le nombre d'éléments augmente.

Si l'on souhaite obtenir le diagramme de rayonnement réel du réseau, nous devons multiplier le facteur de réseau par le diagramme de rayonnement de chaque antenne[3].

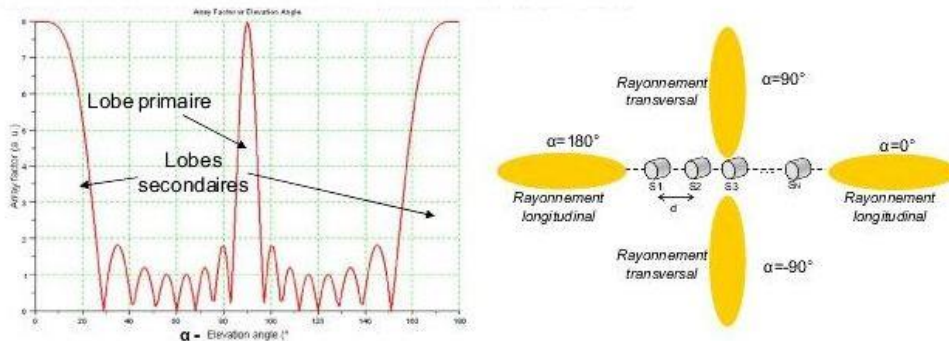


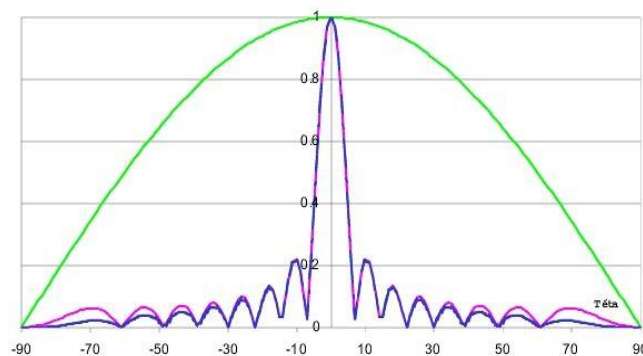
Figure I.12: facteur de réseau pour un réseau composé de 8 éléments

La figure (5) présente un exemple de tracé du facteur de réseau en fonction de l'angle d'élévation pour un réseau de 8 antennes colinéaires séparées de  $d = \lambda$ , et sans déphasage entre les excitations ( $\Phi = 0^\circ$ ). On pose  $A_0 = 1$ . 3 maximum apparaissent pour  $m = -1, 0$  et  $1$ . La valeur maximale prise par le facteur de réseau est de  $8A_0$ . Un lobe primaire apparaît pour  $m = 0$  ( $\psi = 0$ ) c'est-à-dire une élévation  $\alpha = 90^\circ$  (rayonnement transversal). Deux lobes secondaires apparaissent pour  $m = \pm 1$  ( $\psi = \pm 2\pi$ ) c'est-à-dire des élévations  $\alpha = 0/180^\circ$  (rayonnement longitudinal).

Dès que le nombre  $n$  d'éléments devient important (disons supérieur à 10 pour fixer les idées), le diagramme de rayonnement global dépend essentiellement du facteur de réseau, et peu du diagramme de rayonnement de chaque antenne[3].

Pour illustrer cette remarque de manière simple, considérons une antenne dont le diagramme serait en  $\cos(\theta)$  en vert sur la figure I.13 et comparons le rayonnement de cette antenne mise en réseau (16 éléments), avec le Facteur de réseau correspondant, qui, rappelons-le, correspond au rayonnement de 16 antennes isotropes.

On constate que le lobe principal est identique, et que les premières différences notables apparaissent à partir du 3ème lobe de réseau qui est de plus faible amplitude pour l'antenne en  $\cos(\theta)$ , ce que l'on comprend en constatant qu'elle rayonne moins dans cette direction qu'une antenne isotrope.



**Figure I.13: Rayonnement en  $\cos(\theta)$  (vert), 16 antennes isotropes (rose), 16 antennes en  $\cos(\theta)$  (bleu).**

#### I.8.4-Analyse du rayonnement en trois dimensions

Les analyses précédentes ont été simplifiées dans un souci de clarification des phénomènes, le diagramme de rayonnement était représenté dans le plan du réseau, choisi comme le plan  $y = 0$ , ce qui correspond en coordonnées polaire au plan  $\varphi = 0$ .

Dans les autres directions de l'espace, nous devons prendre en compte la dépendance en  $\varphi$ .

Si on reprend une notation déjà utilisée en désignant par M la position courante à l'abscisse x d'une antenne du réseau ; le déphasage de propagation par rapport à l'antenne servant de référence de phase située à l'origine est donné par le produit scalaire :

$$\vec{KOM} = K(x \sin \theta \cos \Phi + Y \sin \theta \sin \Phi + Z \cos \theta) \quad I.27$$

Qui se réduit à  $K \cdot x \sin \theta \cos \Phi$  lorsque le réseau est aligné suivant l'axe des x.

Reprenant la relation I.25, on en déduit que le facteur de réseau dans une direction  $(\theta, \Phi)$  quelconque s'écrit, pour un réseau linéaire régulièrement espacé d'une distance d, disposé suivant l'axe des x [8]

$$F = \frac{e^{\frac{jnKd \sin \theta \cos \theta}{2}} \sin\left(\frac{nKd \sin \theta \cos \theta}{2}\right)}{e^{\frac{jKd \sin \theta \cos \theta}{2}} \sin\left(\frac{Kd \sin \theta \cos \theta}{2}\right)} \quad I.28$$

### I.8.5 -Analyse d'un réseau plan

Nous avançons progressivement dans la généralisation, en considérant un réseau plan constitué par M éléments suivant l'axe des x, et N éléments suivant l'axe des y.

Nous supposons également que ces éléments sont régulièrement espacés, mais d'une distance qui peut être différente suivant l'axe des x, et suivant l'axe des y : nous désignerons ces distances par dx et dy.

L'élément courant sera désigné par (m, n), tandis que l'élément (m=0, n=0) sera situé à l'origine Figure (8)[8].

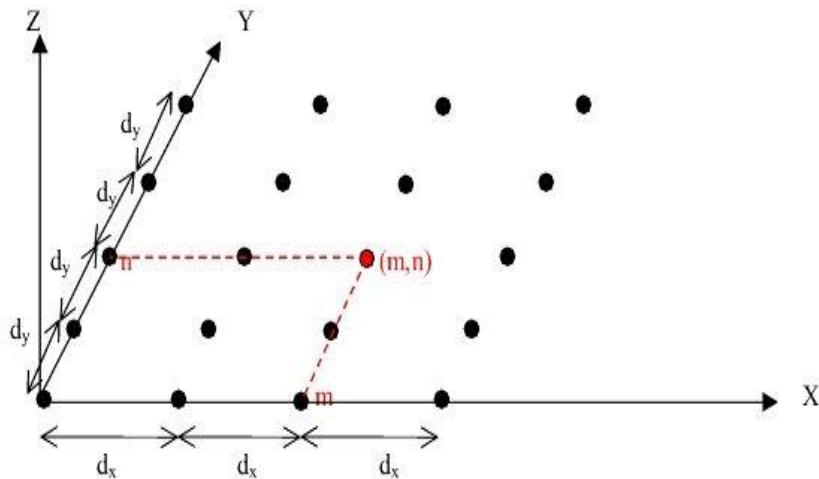


Figure I.14: Représentation d'un réseau plan

Dans ces conditions, le facteur de réseau s'écrit :

$$F = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jK(md_x \cos \phi \sin \theta + nd_y \sin \phi \sin \theta)} \quad \text{I.29}$$

### I.8.6- Prise en compte de l'alimentation

Pour des raisons diverses (pointage, abaissement des lobes secondaires, ...), on peut souhaiter moduler l'amplitude et la phase du signal appliqué à chaque antenne élémentaire du réseau. Si on désigne l'amplitude complexe de ce signal par [8-10] :

$$a_{m,n} = |a_{m,n}| e^{j\beta_{m,n}} \quad \text{I.30}$$

On obtient une expression générale permettant de calculer le facteur de réseau, et le diagramme de rayonnement d'un réseau plan :

$$F(\theta, \Phi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |a_{m,n}| e^{jK(md_x \cos \phi \sin \theta + nd_y \sin \phi \sin \theta + j\beta_{m,n})} \quad \text{I.31}$$

Dans laquelle la dépendance en  $(\theta, \phi)$  de chaque paramètre a été clairement explicitée, avec F :facteur de réseau, E : diagramme de rayonnement de chaque antenne élémentaire, le dernier

terme de l'équation I.30 représentant le vecteur unitaire de polarisation dans chaque direction de l'espace.

La fonction qui représente le facteur de réseau étant relativement complexe, il n'est plus possible de faire un calcul analytique de directivité : il devient nécessaire de faire appel à des méthodes d'intégration numérique afin d'obtenir la puissance totale rayonnée.

De plus, il n'est plus possible de simplifier le problème par une analyse à une dimension dans laquelle le rayonnement resterait isotrope en  $\theta$  ou en  $\phi$ , comme en témoignent toutes les relations obtenues précédemment.

### I.8.7.1 Evolution de la directivité en fonction de la distance entre éléments

Afin de bien identifier l'influence de la distance entre éléments, nous allons considérer un réseau de 2 éléments au rayonnement isotrope, disposés sur l'axe du x, et séparés par une distance variable d. Dans ces conditions, le diagramme de rayonnement est donné par la relation [8] :

$$E(\theta, \Phi) = \left| \cos \frac{e^{Kd \sin \theta \cos \phi}}{2} \right| \quad \text{I.33}$$

$$\iint_s \frac{E^2(\theta, \phi)}{\eta} ds = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{E^2(\theta, \phi)}{\eta} r^2 \sin \theta d\phi d\theta \quad \text{I.34}$$

Par définition, la directivité dans une direction quelconque de l'espace est donnée par la relation :

$$D(\theta, \Phi) = \frac{\frac{E^2(\theta, \phi)}{\eta}}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{E^2(\theta, \phi)}{\eta} r^2 \sin \theta d\phi d\theta} 4\pi r^2 \quad \text{I.35}$$

Lorsque  $d = 0$ , on déduit de (I.32) et (I.34) que la directivité est constante et égale à 1: les deux éléments sont superposés à l'origine et rayonnent ensemble de manière isotrope.

Lorsque d augmente, la directivité maximum obtenue dans la direction  $\theta = 0$  prend la forme :

$$D_{max}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{1}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left( \cos \frac{Kd \sin \theta \cos \phi}{2} \right)^2 \sin \theta d\phi d\theta} \quad \text{I.36}$$

On constate que le maximum de directivité est atteint au voisinage de  $d = 0.7 \lambda$  : c'est la distance qu'il faudra chercher à atteindre lors de la réalisation de réseaux directifs. (I-7-b)

Evolution de la directivité en fonction du nombre d'éléments

Rappelons le diagramme de rayonnement d'un réseau aligné de  $n$  éléments isotropes régulièrement espacés d'une distance  $d$  (23), étendu à toutes les directions de l'espace :

$$F(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{nKd \sin\theta \cos\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Kd \sin\theta \cos\varphi}{2}\right)} \right| \quad \text{I.37}$$

Et un raisonnement analogue au précédent conduit à l'expression de la directivité maximum suivante :

$$D_{max}(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{n^2}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left( \frac{\sin\left[\frac{nKd \sin\theta \cos\varphi}{2}\right]}{\sin\left[\frac{Kd \sin\theta \cos\varphi}{2}\right]} \right)^2 \sin\theta d\varphi d\theta} \quad \text{I.38}$$

Pour  $d = 0.5 \lambda$ , le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Nombre d'éléments : n	1	2	4	8	16	32	64
Directivité maximale en Db	0	3	6	9	12	15	18

Pour  $d = 0.5 \lambda$ , un réseau de  $n=2^K$  éléments a une directivité égale à  $(3 \cdot K)$  dB. Ainsi, un réseau ayant un gain de 27 dB doit comporter au minimum  $2^9 = 512$  éléments.

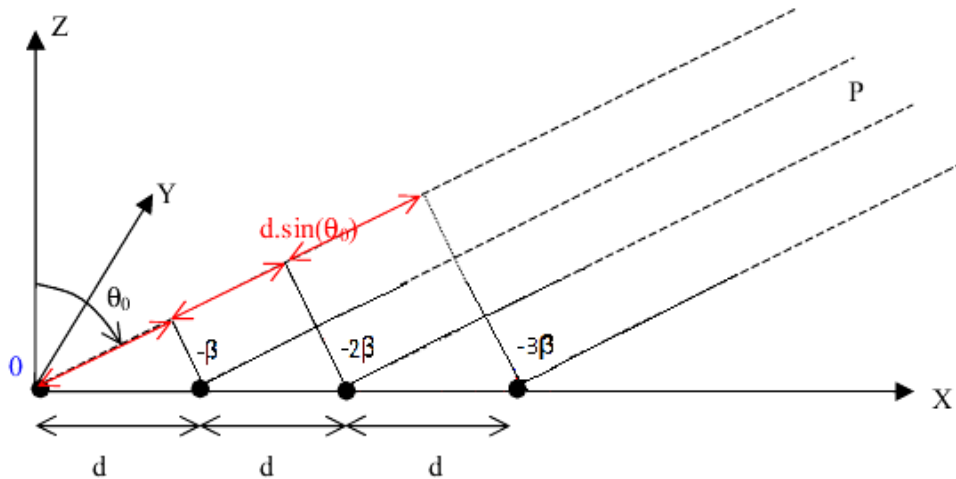
On ne peut cependant espérer augmenter indéfiniment le gain d'un réseau. Au fur et à mesure que le nombre d'éléments augmente, il faut répartir et distribuer l'énergie à chacun de ces éléments, ce qui induit des pertes qui annihilent l'effet réseau au-delà d'un certain nombre d'éléments.

Pratiquement la limite actuelle de gain, pour des réseaux d'antennes imprimées aux fréquences microondes, est d'une trentaine de dB.[65]

### I.8.8 -Le pointage électronique

Les exemples présentés jusqu'à présent concernent des réseaux dont le maximum de rayonnement se situe dans l'axe normal au réseau.

Pour obtenir un maximum dans une autre direction, disons la direction  $\theta_0$  de la figure (III-8), il est nécessaire de compenser chaque déphasage de propagation  $kdsin(\theta_0)$  par un déphasage opposé apporté à chacune des sources, de sorte que le rayonnement de chaque source parvienne en phase au point P.



**Figure I.15: Evolution du diagramme de rayonnement d'un réseau de 2 éléments en fonction de  $\theta$ , dans le plan du réseau.**

La source à l'origine étant prise comme référence, la deuxième source devra être déphasée de  $-kdsin(\theta_0)$ , la troisième de  $-2kd sin(\theta_0)$ ...etc.

Si on désigne par  $\beta$  le gradient de phase entre deux sources successives, la direction de pointage du réseau  $\theta_0$  sera donnée par la relation

$$\beta = Kdsin(\theta_0) \theta_0 = \text{Arc sin}(\beta\lambda/2\pi d) \text{ I.39}$$

Pour un réseau à n éléments, le Facteur de réseau devient :

$$F(\theta, \varphi) = \left| \frac{\sin\left(\frac{nKd \sin\theta \cos\varphi - n\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{Kd \sin\theta \cos\varphi - \beta}{2}\right)} \right| \text{ I.40}$$

Et on peut donner une représentation du diagramme de rayonnement dans le plan  $\varphi = 0$ , en fixant arbitrairement le nombre d'éléments à  $n = 16$ , et la distance entre éléments à  $d = \lambda / 2$  [7].

**I.9 .Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné des généralités sur les antennes et leurs caractéristiques. Nous avons également tracé le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes pour différentes valeurs de la distance entre les deux éléments rayonnants  $d$  ainsi que pour différentes valeurs du nombre d'antennes  $N$ .

---

---

*Chapitre II*  
*Les algorithmes méta-*  
*heuristiques*

---

---

## **II.1. Introduction**

Les méta-heuristiques sont des algorithmes itératifs, souvent inspirés de la nature (insectes, animaux..), conçues pour résoudre les problèmes d'optimisation complexes. Parmi les méta-heuristiques les plus utilisés celle inspirées des fourmis.

La plupart des animaux sont beaucoup moins intelligents que l'homme, mais sont cependant capables de réalisations assez évoluées. Considérons par exemple les insectes. Individuellement, une fourmi ou une abeille n'est pas capable de s'adapter aux situations nouvelles. Pourtant, le groupe réalise des tâches très évoluées, comme la construction d'une ruche ou d'une fourmilière. Les insectes sociaux semblent compenser leurs faiblesses individuelles par une coordination globale qui donne à la colonie une forme d'intelligence bien supérieure à celles de ses membres[11].

Les fourmis sont devenues dès lors une nouvelle source d'inspiration pour la conception de méthodes de résolution de problèmes complexes. De plus cette source d'inspiration n'est pas unique étant donné que les fourmis sont dotées d'une grande diversité de caractéristiques disjointes et de comportements collectifs variés.

Ce présent chapitre est consacré à présenter une introduction au monde des fourmis biologiques, ainsi les algorithmes reproduisant les facultés de l'insecte « fourmis » qui forment ainsi une classe de méta heuristique récemment proposée pour les problèmes d'identification [11].

## **II.2 - Les problèmes d'optimisation**

La résolution des problèmes d'optimisation est utilisée dans un grand nombre de domaines. A l'origine, ce sont les militaires qui se sont intéressés à ces questions au cours de la seconde guerre mondiale. C'était en fait un nouveau domaine de recherche en mathématiques appliquées qui a vu le jour avec la recherche opérationnelle. Le développement de l'informatique a ouvert de nouveaux horizons à la résolution de ces problèmes, et a permis un élargissement massif des champs d'application de ces techniques.

La résolution d'un problème d'optimisation et un problème complexe, car de nombreux facteurs interviennent et interagissent entre eux. Néanmoins, l'optimisation appliquée au domaine d'électronique permet de résoudre des problèmes qui étaient insolubles auparavant et aboutit souvent à des solutions originales [12-13].

### II.3 - Les éléments d'optimisation

L'optimisation est une des mathématiques consacré à l'étude des minimums ou des maximums d'une fonction à une ou plusieurs variables sur un certain domaine de définition, de l'étude de leur existence à leur détermination, en général par la mise en œuvre d'un algorithme et par suite un programme. Pour mener à bien une opération, plusieurs éléments sont indispensables et conditionnent la solution trouvée. La figure suivante présente les quatre éléments essentiels à la résolution d'un problème d'optimisation.

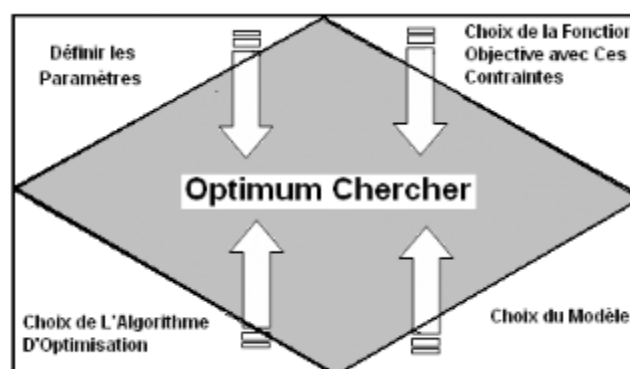


Figure II.1 : Eléments indispensable d'optimisation [13].

En général, un grand nombre de paramètres sont indispensables, il faut être capable de définir les paramètres utiles à l'optimisation. Certains paramètres ont une influence sur la fonction choisie, d'autres pas. Etant donné le coût des simulations, seul les paramètres influents sont à retenir :

**Une fonction objective** : définie l'objectif à atteindre. La définition de cette fonction est en fait un problème délicat. Car le problème est formulé en un problème d'optimisation par l'intermédiaire de la fonction objective. C'est elle qui est au centre de l'optimisation, c'est donc elle que dépend la pertinence de la solution.

**Un modèle** : précis, robuste et malléable du système étudié est indispensable. Ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude le plus large possible.

**Un algorithme d'optimisation** : permet de trouver la solution. Différentes méthodes d'optimisation existent et en sont présentées [13].

## **II.4 - L'optimisation combinatoire**

L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. L'optimisation combinatoire est minimiser (ou maximiser) une fonction souvent appelée fonction coût ou fonction objective, d'une ou plusieurs variables soumises à des contraintes. Le sujet de l'optimisation combinatoire dans un domaine discret. Il faut trouver parmi toutes les possibilités, souvent en nombre fini, la possibilité optimale. Ceci paraît facile mais devient infaisable dès que la taille du problème est suffisamment grande. La taille pour laquelle la recherche d'un optimum devient infaisable est petite, très souvent plus petite que la taille des problèmes pratiques. En général, la difficulté d'un problème grandit très vite avec le nombre des variables. Il n'est pas alors faisable d'examiner toutes les possibilités.

Les méthodes d'optimisation peuvent être réparties en deux catégories :

- Méthodes exactes.
- Méthodes approchées.

Les méthodes exactes fournissent systématiquement une solution (optimale) au problème traité si une telle solution existe. Dans le cas contraire, ce type de méthode permet d'affirmer qu'il n'existe pas de solution au problème traité.

Les méthodes approchées fournissent une solution approchée au problème traité. Elles sont en général conçues de manière à ce que la solution obtenue puisse être située par rapport à la valeur optimale : de telle méthodes permettent d'obtenir des bornes inférieures ou supérieures de la valeur optimale tel que :

- Méthodes Heuristiques ;
- Méthodes Méta heuristiques [14].

## **II.5 - La démarche heuristique**

L'heuristique est une méthode, une technique ou un critère de guidage ou de décision, en général empirique ou obtenu par approximation, permettant de choisir la voie la plus prometteuse de recherche de la solution au problème posé, ou d'éliminer les voies les moins intéressantes, sans garantie sur la validité ou la précision de l'information ainsi fournie.

Les heuristiques disposent d'une simplicité et donc d'une rapidité dans leur exécution plus élevée que les algorithmes classiques. Ces règles s'appliquant à un ensemble particulier la recherche des faits ce voit simplifiée et accélérée (moins de possibilité). D'où une analyse des situations améliorées. Mais une méthode heuristique trop simplifiée ou au contraire trop générale peut conduire à des biais cognitifs, générant des erreurs de décision.

L'utilisation de plus de ces éléments simples (les heuristiques) afin de créer des éléments plus complexes (les méta- heuristiques) permet donc de réduire considérablement l'ensemble de recherche global de l'algorithme. L'une de leur caractéristique principale et à première vue défaut, dont hérite également les méta- heuristiques, est qu'ils peuvent dans certains cas ne pas proposer de solution optimale au problème. Mais au résultat s'y approchant d'assez près pour qu'il soit considéré comme correct, on parle alors de garantie de performance [15].

## **II.6 - Les méta-heuristiques**

Les métas- heuristiques sont apparues dans les années 1980 et forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé. Etymologiquement parlant de ce mot est composé dans un premier temps du préfixe *méta* qui signifie « au delà » ou « plus haut » en grec puis de *heuristique* qui signifie « trouver ». Cette décomposition permet de facilement comprendre le but premier de ces algorithmes : trouver des solutions à des problèmes en utilisant plusieurs (méta) heuristiques.

Métas heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de chercher de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. En plus de cette base stochastique, les méta-heuristiques sont généralement itératives, c'est-à-dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes.

Elles tirent en particulier leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche [16].

Les méta heuristiques, du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions. Pour illustrer cette caractéristique, citons notamment :

- **L'optimisation multi objectif** (dites aussi multicritère) : ou il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise alors non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima «au sens de Pareto» formant la «surface de compromis» du problème.
- **L'optimisation multimodale** : ou l'on cherche un ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux.
- **L'optimisation de problèmes bruités** : où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif. Incertitude dont il faut alors tenir comptes dans la recherche de l'optimum.
- **L'optimisation dynamique** : ou la fonction objective varie dans le temps. Il faut alors approcher au mieux l'optimum à chaque pas de temps.
- **La parallélisations** : ou l'on cherche à accélérer la vitesse de l'optimisation en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les méta-heuristiques pour qu'elles soient distribuées.
- **L'hybridation** : qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta- heuristiques différentes en les combinant.

Enfin, la grande vitalité de ce domaine de recherche ne doit pas faire oublier qu'un des intérêts majeurs des méta- heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes concrets. L'utilisateur est généralement demandeur de méthodes efficaces permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable. Un des enjeux de la conception des méta- heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter à un problème donné [17].

### II.6.1- Organisation générale

D'une manière générale, les méta- heuristiques s'articulent autour de trois notions :

1. **Exploration** : désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème optimisé.
2. **Exploitation** : vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.
3. **La mémoire** : est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optimums locaux.

Les méta-heuristiques progressent de façon itérative, en alternant des phases d'intensification, de diversification et d'apprentissage. L'état de départ est souvent choisi aléatoirement, l'algorithme se déroulant ensuite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Certains problèmes d'optimisation combinatoire demeurent hors de portée des méthodes exactes. Un certain nombre de caractéristiques peuvent en effet être problématiques, comme l'absence de convexité stricte (multi-modalité), l'existence de discontinuités, une fonction non dérivable, présence de bruit,...etc. Dans de tels cas, le problème d'optimisation est dit "difficile", car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre exactement en un temps "raisonnable", on devra alors faire appel à des méta-heuristiques permettant une optimisation approchée [16].

### II.6.2 - Applications

Les méta-heuristiques sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (les méthodes de voisinage comme le recuit simulé et la recherche tabou), en biologie de l'évolution (les algorithmes évolutifs comme les algorithmes génétiques et les stratégies d'évolution) ou encore en éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis) [17].

### II.6.3 - Méta-heuristique à recuit simulé

La méthode de recuit simulé s'inspire du processus de recuit physique. Ce processus utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un solide cherche un état d'énergie minimale qui correspond à une structure stable du solide. Les origines du recuit simulé remontent aux expériences réalisées par Métropolis dans les années 50 pour simuler l'évolution d'un tel processus de recuit physique. Métropolis utilise une méthode stochastique pour générer une suite d'états successifs du système en partant d'un état initial donné. Tout nouvel état est obtenu en faisant subir un déplacement (une perturbation) aléatoire à un atome quelconque.

Le recuit simulé constitue, parmi les méthodes de voisinage, l'une des plus anciennes et des plus populaires.

#### II.6.4 - Les méta- heuristiques évolutionnaires (génétiques)

Les algorithmes génétiques appartiennent à une famille d'algorithmes appelés méta-heuristique dont le but est d'obtenir une solution approchée, en un temps correct, à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle développée par le scientifique Charles Darwin au XIX<sup>ème</sup> siècle.

L'utilisation d'algorithmes génétiques dans la résolution de problèmes est à l'origine des recherches de John Holland dès 1960. La nouveauté introduite a été la prise en compte d'un opérateur en complément des mutations, et c'est cet opérateur qui permet le plus souvent de se rapprocher de l'optimum d'une fonction en combinant les gènes contenus dans les différents individus de la population [18-20].

#### II.6.5 - Les méta- heuristiques éthologiques (colonies de fourmis)

Cette méta-heuristique s'inspire des comportements collectifs des fourmis dans leurs découvertes de nouvelles sources de nourriture: en effet ces insectes utilisent des phéromones afin de marquer les informations qu'ils ont recueillies sur leur environnement. L'utilisation de ces phéromones leur permettent de repérer le plus court chemin entre une source de nourriture et leur nid. Car malgré leur capacité cognitive limitée, elles sont collectivement capables de résoudre des problèmes complexes.

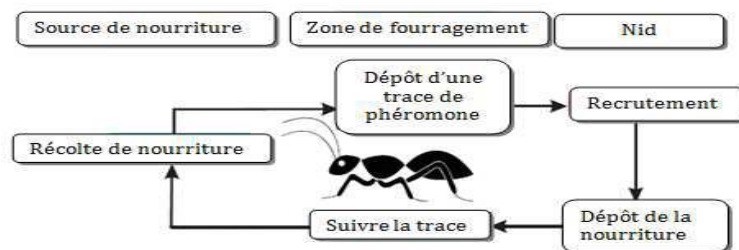


Figure II.2 : Comportement d'une fourmi naturelle lors de la recherche de nourriture [16].

### II.6.5.1 - Colonies de fourmis

La place des fourmis dans l'étude des sociétés animales est centrale car elles ont développé des formes très avancées de socialité allant jusqu'à partager leur activité de reproduction en confiant la transmission de leurs gènes à quelques individus de la colonie [21].

### II.6.5.2 - Les pistes de phéromones

Les fourmis ont la particularité d'employer pour communiquer des substances volatiles appelées phéromones. Elles sont attirées par ces substances, qu'elles perçoivent grâce à des récepteurs situés dans leurs antennes. Ces substances sont nombreuses et varient selon les espèces. Les fourmis peuvent déposer des phéromones au sol, grâce à une glande située dans leur abdomen, et former ainsi des pistes odorantes, qui pourront être suivies par leurs congénères (Figure 2.3).

Les fourmis utilisent les pistes de phéromone pour marquer leur trajet, par exemple entre le nid et une source de nourriture. Une colonie est ainsi capable de choisir (sous certaines conditions) le plus court chemin vers une source à exploiter, sans que les individus aient une vision globale du trajet.

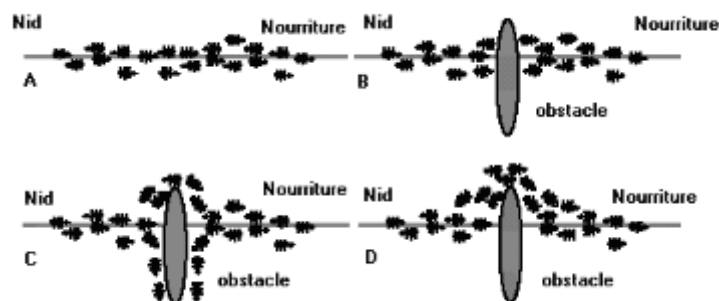


Figure II.3 : Le chemin entre le nid et la nourriture [16].

- (a) Dans cette figure les fourmis réelles suivent un chemin entre le nid et la nourriture.
- (b) Un obstacle apparaît sur le chemin : Les Fourmis choisissent de tourner soit à gauche soit à droite avec une probabilité égale.
- (c) La phéromone est déposée plus rapidement sur le chemin le plus court.
- (d) Toutes les fourmis ont choisi le chemin le plus court.

Il est difficile de connaître avec précision les propriétés physico-chimiques des pistes de phéromone, qui varient en fonction des espèces et d'un grand nombre de paramètres. Cependant, les méta-heuristiques d'optimisation de colonies de fourmis s'appuient en grande partie sur le phénomène d'évaporation des pistes de phéromone. Or, on constate dans la nature que les pistes s'évaporent plus lentement que ne le prévoient les modèles.

Les fourmis disposent en effet « d'heuristiques » leur apportant un peu plus d'informations sur le problème (par exemple une information sur la direction). Il faut garder à l'esprit que l'intérêt immédiat de la colonie (trouver le plus court chemin vers une source de nourriture) peut être en concurrence avec l'intérêt adaptatif de tels comportements. Si l'on prend en compte l'ensemble des contraintes que subit une colonie de fourmis (prédation, compétition avec d'autres colonies, etc.), un choix rapide et stable peut être meilleur, et un changement de site exploité peut entraîner des coûts trop forts pour permettre la sélection naturelle d'une telle option [16].

## **II.7 - API (*Pachycondyla apicalis*)**

Nous présentons dans cette section une nouvelle méta-heuristique s'inspirant de l'auto-organisation chez l'espèce de fourmis néotropicale *Pachycondyla apicalis*. Ceci revient à utiliser la métaphore de cette espèce de fourmis pour concevoir des méta-heuristiques d'optimisation adaptées aux problèmes combinatoires.

La grande part à cette espèce de fourmis et a énoncé que l'intérêt de ces fourmis pour l'optimisation vient du fait qu'elles utilisent des principes relativement simples d'un point de vue globale et local pour rechercher leurs proies[22]. Les fourmis explorent à partir d'un point central qui est le Nid et tendent à s'éloigner au fur et à mesure des itérations.

Cette espèce de fourmis est caractérisée par sa stratégie de recherche de proie relativement simple d'un point de vue local et global. Dans cette espèce de fourmis les individus chassent en solitaire en essayant de couvrir uniformément un espace donné autour du nid en le partitionnant en sites de chasses. Le nid change d'emplacement périodiquement. En optimisation, cela correspond à un algorithme qui effectue plusieurs recherches aléatoires en parallèle, dans un sous espace centré en un point. Le déplacement du nid correspond à un opérateur de réinitialisation dans les recherches parallèles où le point central est déplacé.

Le comportement de recherche de nourriture de cette espèce de fourmis n'est pas un comportement collectif direct ; c'est-à-dire que les ouvrières ne déposent pas de message chimique sur le sol pour indiquer aux autres fourrageuses le chemin menant à une source de nourriture. On peut supposer que la nature des proies recherchées n'encourage pas spécialement ce genre de communication inter-individus : la présence des proies étant relativement aléatoire, la capture d'une proie ne donne que peu d'informations sur la stabilité spatiale de la source de nourriture. Autrement dit, la probabilité de retrouver une proie dans la même zone qu'une précédente capture n'est pas suffisante pour y canaliser les forces de fourragement de la colonie. Cependant, d'un point de vue individuel, les ouvrières mémorisent leur site de capture et lors de leur prochaine sortie du nid, elles retournent systématiquement sur le dernier site de chasse fructueux. Cette spécialisation sectorielle est une réponse pour l'adaptation nécessaire à la découverte et l'exploitation de sources de nourriture[22-23].

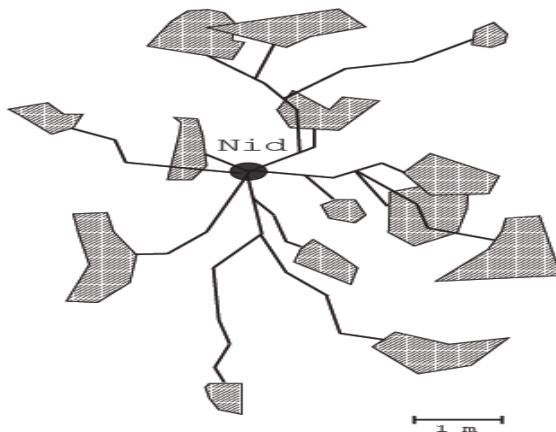
Ce type de fourragement solitaire se retrouve particulièrement chez les espèces peu peuplées, les espèces à population importante utilisent des mécanismes de recrutement massif beaucoup plus couramment [23]. Les fourrageuses solitaires développent en conséquence des mécanismes d'apprentissage plus évolués.

De sorties en sorties, les ouvrières s'éloignent du nid car la probabilité de trouver une proie est inversement proportionnelle à la densité de fourrageuses qui décroît évidemment quand la distance au nid augmente. Les fourrageuses ont donc un comportement collectif indirect puisque de manière statistique elles coopèrent pour couvrir au mieux leur espace de recherche que constitue le voisinage du nid. Elles construisent de cette façon une mosaïque de zones de chasse qui couvre la périphérie du nid.

Le comportement de fourragement de *Pachycondyla apicalis* peut être résumé en trois règles [23]:

- (a) La découverte d'une proie entraîne toujours le retour sur ce site lors de la sortie suivante, c'est là que la fourrageuse reprend ses nouvelles prospections;
- (b) La découverte d'une proie pèse sur la décision de sortie des fourrageuses en réduisant

(c) l'intervalle de temps qu'elles passent au nid;



La figure 2.4 représente les aires de fourrage d'une colonie

*Pachycondyla apicalis*.

Les fourrageuses semblent progressivement apprendre une association entre une direction de recherche opposée au nid et l'augmentation de la probabilité de succès.

Ces règles ont l'avantage évident d'être très simples. On peut cependant préciser quelques points :

- Lors de ses premières sorties, la fourmi sort du nid et prend une direction aléatoire mais s'éloigne peu du nid et retourne à l'abri de celui-ci à la moindre alerte. Son trajet est relativement sinueux ;
- Si la fourmi capture une proie, elle retourne directement au nid en ligne droite et mémorise visuellement le chemin qu'elle emprunte;
- Après une capture, la fourmi utilise le chemin qu'elle a mémorisé pour retourner au site de capture.
- Le retour sur le site de chasse se soldant par un échec peut se produire plusieurs fois de suite (en moyenne quatre fois);
- Un site de chasse ne produisant plus le renforcement que constitue la capture d'une proie est abandonné mais n'est pas obligatoirement oublié par la fourrageuse;
- L'exploration d'un site de capture privilégie les directions qui éloignent la fourmi du nid dans une limite de périmètre imposée par le coût énergétique prohibitif que représente un échec à une grande distance du nid.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la fragilité du nid impose des déménagements réguliers. Des fourmis éclairceuses partent alors à la recherche d'un nouvel abri. Le déménagement s'effectue grâce à des mécanismes de recrutement. Une fourmi se fait guider par une de ses congénères jusqu'au nouvel emplacement. Ce changement de nid a pour effet de « réinitialiser » la mémoire des fourrageuses.

C'est à cette occasion que l'utilisation de repères visuels prend toute son importance : le marquage de chemins avec des phéromones perturberait l'adaptation des fourmis à la situation de leur nouveau nid, car les anciens chemins interfèreraient avec les nouveaux. Avec une mémoire visuelle, les fourrageuses reconstruisent un réseau de sites de chasse autour du nouveau nid plus aisément, plus rapidement.

L'aspect individuel de la recherche est particulièrement adapté à la fréquence d'apparition des proies : si une proie tombe sur le sol et est capturée, la fourrageuse reviendra explorer le site toute seule. Si la proie est trop lourde, elle sera découpée puis transportée en plusieurs voyages par la même fourmi qui utilise de cette façon sa mémoire. Si le site de chasse se trouve être un gisement (par exemple des termites) la fourrageuse reviendra systématiquement jusqu'à épuisement du site.

L'intérêt de la stratégie de fourragement des fourmis *Pachycondyla apicalis* réside dans sa simplicité et la bonne couverture de l'espace de recherche qui en résulte. On a ici un phénomène d'émergence : de règles de recherche simples et individuelles, qui ne tiennent pas compte du travail des autres fourmis, on obtient une exploration radiale de l'espace centrée sur le nid.

Dans la réalité, l'efficacité de la stratégie n'est pas parfaite si on considère le nombre de proies trouvées relativement au nombre de proies présentes. Cependant, la taille d'une colonie de *Pachycondyla apicalis* étant relativement réduite, les besoins en nourriture sont relativement modestes. Il semble que l'adaptation de ces fourmis ne réside pas seulement dans leur comportement de fourragement mais aussi dans le maintien de colonies peu peuplées. Ceci permet aux *Pachycondyla apicalis* de survivre dans des secteurs comportant de nombreux prédateurs concurrents et de ne pas nécessiter une grande quantité d'insectes. L'intérêt de ces fourmis pour l'optimisation vient du fait qu'elles utilisent des principes relativement simples à la fois d'un point de vue global et local pour rechercher leurs proies. A partir de leur nid, elles couvrent globalement une surface donnée en la partitionnant en sites de chasse individuels.

Pour une fourmi donnée, on observe une stratégie d'exploration aléatoire des sites sensible au succès rencontré. Ces principes peuvent être repris pour résoudre un problème analogue qui est la recherche d'un minimum global, par exemple d'une fonction  $f$  définie de  $R^S$  dans  $R$ .

### II.7.1 - Modélisation algorithmique

Dans cette section nous présentons la modélisation algorithmique proposée par Monmarché[20] pour la résolution des problèmes d'optimisation.

Monmarché considère une population de  $n$  fourmis fourrageuses  $a_1, \dots, a_n$  de l'espèce *Pachycondyla apicalis*. Ces agents sont positionnés dans l'espace de recherche, noté  $S$ , et vont tenter de minimiser ou de maximiser une fonction d'évaluation ou bien une fonction objectif  $f$  définie de  $S$  dans  $R$ .

Chaque point  $s \in S$  est une solution valide du problème, ce qui signifie que  $f$  est définie en tout point de  $S$ . cet espace de recherche peut être un espace continu, binaire ou un espace de permutations.

La définition des deux opérateurs suivants est suffisante pour déterminer le déplacement des fourmis :

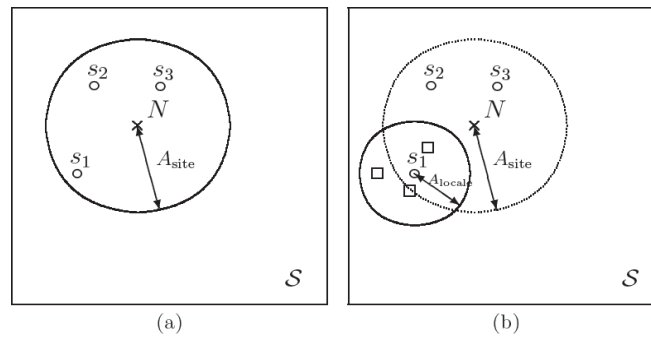
1. L'opérateur  $O_{rand}$  qui génère un point de  $S$  de manière uniformément aléatoire;
2. L'opérateur  $O_{explo}$  qui génère un point  $s'$  dans le voisinage d'un point.

L'opérateur  $O_{rand}$  est un opérateur qui permet de générer l'emplacement initial du nid d'une manière uniformément aléatoire. Tandis que le deuxième opérateur  $O_{explo}$  peut être une exploration aléatoire tout comme une heuristique inspirée par le domaine de recherche.

Le comportement des fourmis pour la recherche des proies peut être réparti en deux phases, la première présente le comportement local des fourmis, et la deuxième présente le comportement global.

### II.7.2 - Comportement local des fourmis

L'exploration des sites de chasse ou de recherche pour L'API est illustrée dans la figure suivante :



**Figure II.5: Exploration des sites de chasse[20].**

. (a) recherche de sites de chasse. (b) Exploration locale de la fourmi autour du site  $s_1$ .

Le comportement local des fourmis est le comportement individuel de chaque fourmi lors de la génération de l'emplacement initial du nid et à chaque déplacement de celui-ci.

Chaque fourmi  $a_i$  quitte le nid pour se constituer une liste de  $p$  sites de chasse qu'elle mémorise. Un site de chasse est un point de  $S$  construit par l'opérateur  $O_{explo}$  avec une amplitude  $A_{site}(a_i)$  dans le voisinage de  $N$ . La fourmi  $a_i$  va ensuite procéder à une exploration locale autour d'un de ses sites de chasse (figure 2.5).

Initialement, quand l'intérêt des sites est inconnu, la fourmi choisit un site  $s$  au hasard parmi les  $p$  dont elle dispose. L'exploration locale consiste à construire un point  $S'$  de  $S$  dans le voisinage de  $s$  grâce à l'opérateur  $O_{explo}$  avec une amplitude  $A_{locale}(a_i)$ . La fourmi  $a_i$  capture une proie si cette exploration locale a permis de trouver une meilleure valeur de  $f$ , ce qui revient à avoir  $f(s'') < f(s)$  dans le cas de minimisation (et  $f(s'') > f(s)$  dans le cas de maximisation). Une amélioration de  $f$  modélise donc la capture d'une proie. A chaque fois qu'une fourmi parvient à améliorer  $f(s)$  elle mémorise  $S'$  à la place de  $s$  et sa prochaine exploration locale aura lieu dans le voisinage de  $S'$ . Si l'exploration locale est infructueuse, pour la prochaine exploration, la fourmi choisira un site au hasard parmi les  $p$  sites qu'elle a en mémoire.

Quand un site a été exploré successivement plus de  $P_{locale}$  fois sans avoir rapporté de proie, il est définitivement oublié et sera remplacé par un nouveau site à la prochaine itération (c'est-à-dire la prochaine sortie du nid). Le paramètre  $P_{locale}$  représente une patience locale.

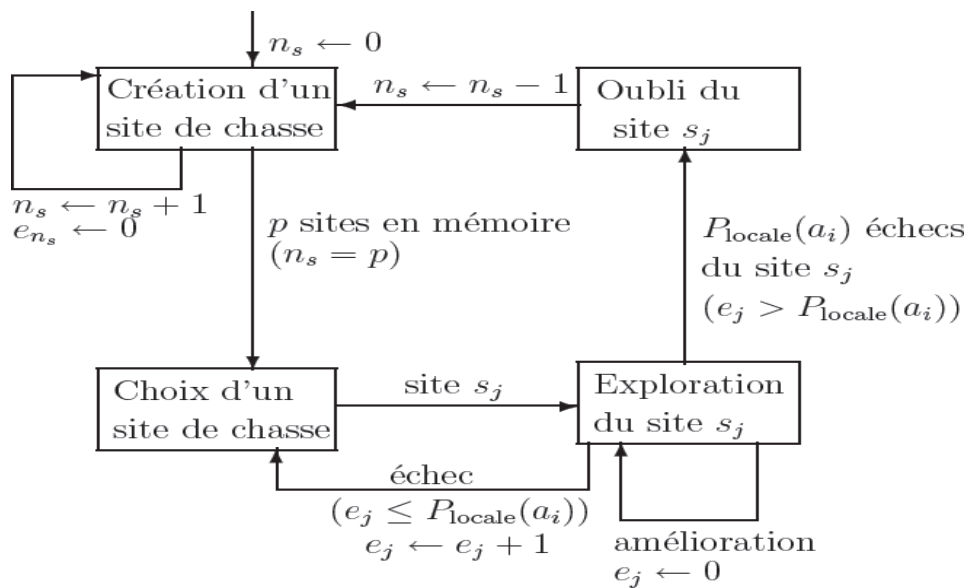


Figure II.6: Le comportement de fourragement d'une fourmi.

$a_i$  est une fourmi,  $n_s$  est le nombre de sites de chasse dans la mémoire de la fourmi,  $e_j$  est le nombre d'échecs successifs rencontrés sur le site  $s_j$ ,  $P_{locale}$  est la patience locale de la fourmi, elle représente le nombre d'échecs rencontrés par la fourmi sur le même site de chasse [20].

### II.7.2.1 - Exploration globale

D'un point de vue global, API place le nid à une position  $N$  de  $S$  et procède à l'exploration de  $S$  autour de  $N$ . L'exploration est déterminée par le comportement local des fourmis.

A chaque pas de l'algorithme les  $n$  fourmis sont simulés en parallèle. A l'initialisation, le nid est placé dans  $S$  de manière uniformément aléatoire par l'opérateur  $O_{rand}$ . Puis le nid est déplacé toutes les  $P_N$  déplacements des  $n$  fourmis. Il est alors placé sur le meilleur point  $s^+$  trouvé depuis son dernier déplacement. A chaque déplacement du nid les fourmis reprennent leur exploration à partir de la nouvelle position du nid.

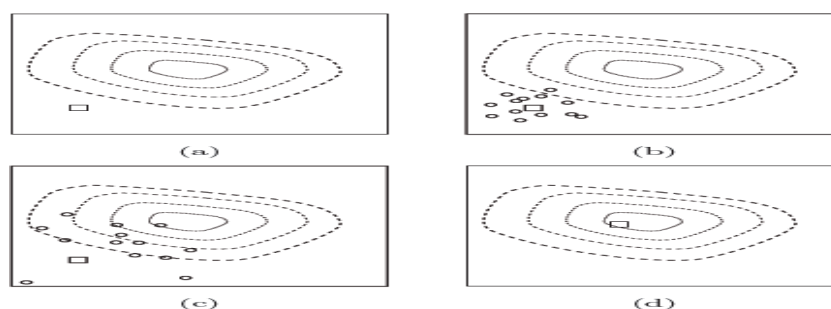


Figure II.7: Exploration globale : Déplacement du nid [20].

- (a) le nid (le carré) est placé aléatoirement dans l'espace de recherche.
- (b) les sites de chasse (cercles) créés autour du nid.
- (c) l'exploration locale déplace cause le déplacement des sites vers des zones plus intéressantes de l'espace de recherche.
- (d) le nid est déplacé sur la position du meilleur site de chasse, les sites sont ensuite générés à partir de cette nouvelle position, comme dans (b), et ainsi de suite.

Enfin, à chaque déplacement du nid, la mémoire des fourmis est vidée et elles doivent reconstruire leurs  $p$  sites de chasse.

Du point de vue de l'optimisation, cela permet d'éviter des minima locaux dans lesquels les fourmis resteraient enfermées. Cela permet aussi de rassembler les fourmis autour du meilleur point trouvé et ainsi de concentrer les recherches.

On pourrait cependant procéder d'une manière plus « douce » : il suffirait de placer le nid à la position du minimum global trouvé par la colonie à chaque fois que celui-ci est amélioré sans réinitialiser toutes les fourmis.

Ainsi, quand une fourmi crée un nouveau site de chasse, elle le ferait dans le voisinage l'optimum global.

## **II.10- Conclusion**

Ce chapitre a décrit les principales méta-heuristiques, leurs origines, principes de fonctionnement, et leurs algorithmes de bases. De plus nous avons présenté les deux méthodes que nous avons adapté pour la résolution de notre problème, à savoir, l'algorithme API basé sur le comportement de fourragement de l'espèce de fourmis *Pachycondyla apicalis*.

---

*Chapitre III*  
*Optimisation par algorithme*  
*API*

---

### III.1- Introduction

Nous avons discuté dans le chapitre 1 de la relation entre l'augmentation du nombre d'antennes  $N$ , l'influence de la distance  $d$  ainsi que le déphasage  $\Psi$  entre deux antennes adjacentes et l'amélioration de la directivité du diagramme de rayonnement. Ce travail nous permet de montrer l'intérêt d'identifier ces paramètres afin d'optimiser le rayonnement d'un réseau d'antennes.

Ce chapitre présente l'application de la méthode méta-heuristique API au problème de synthèse des réseaux d'antenne afin d'optimiser leur efficacité.

### III.2-Théorie de la méthode de synthèse

Tous les problèmes d'optimisations peuvent se réduire à la minimisation d'un scalaire appelé "fonction objectif" ou "fonction d'erreur". Cette fonction est une représentation de la différence qui existe entre les performances réelles (synthétisées) et désirées (imposées) de l'application que l'on traite. On note  $ERR(x)$  cette fonction d'erreur :

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \rightarrow \text{err}(x_1, \dots, x_n) \quad \text{III.1}$$

Le vecteur  $x$  représente l'ensemble des paramètres accessibles à l'utilisateur et donc modifiable pendant le processus d'optimisation.

Dans notre travail la fonction objective à optimiser est la minimisation de la fonction objective.

L'identification des paramètres, la fonction objective  $F_{obj}$  est donnée par :

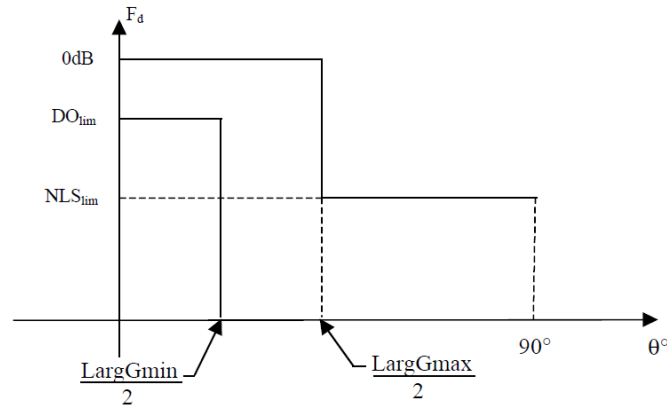
$$\min F_{obj} = \sum_{\theta} \|F_s(\theta) - F_d(\theta)\|^2 \quad \text{III.2}$$

Où

$F_s(\theta)$  et  $F_d(\theta)$  représentent l'état calculé et désiré respectivement du système en fonction de  $(\theta)$ .

### III.3-Synthèse à partir d'un gabarit

Le gabarit peut être défini dans tout l'espace, dans une partie de l'espace ou seulement dans quelques plans. Un exemple de projection de gabarit est donné sur la figure 1, avec les différents paramètres qui permettent de le décrire.



**Figure III.1 : Demi-gabarit centré caractérisant le diagramme désiré**

### III.3-Utilisation de l’algorithme API

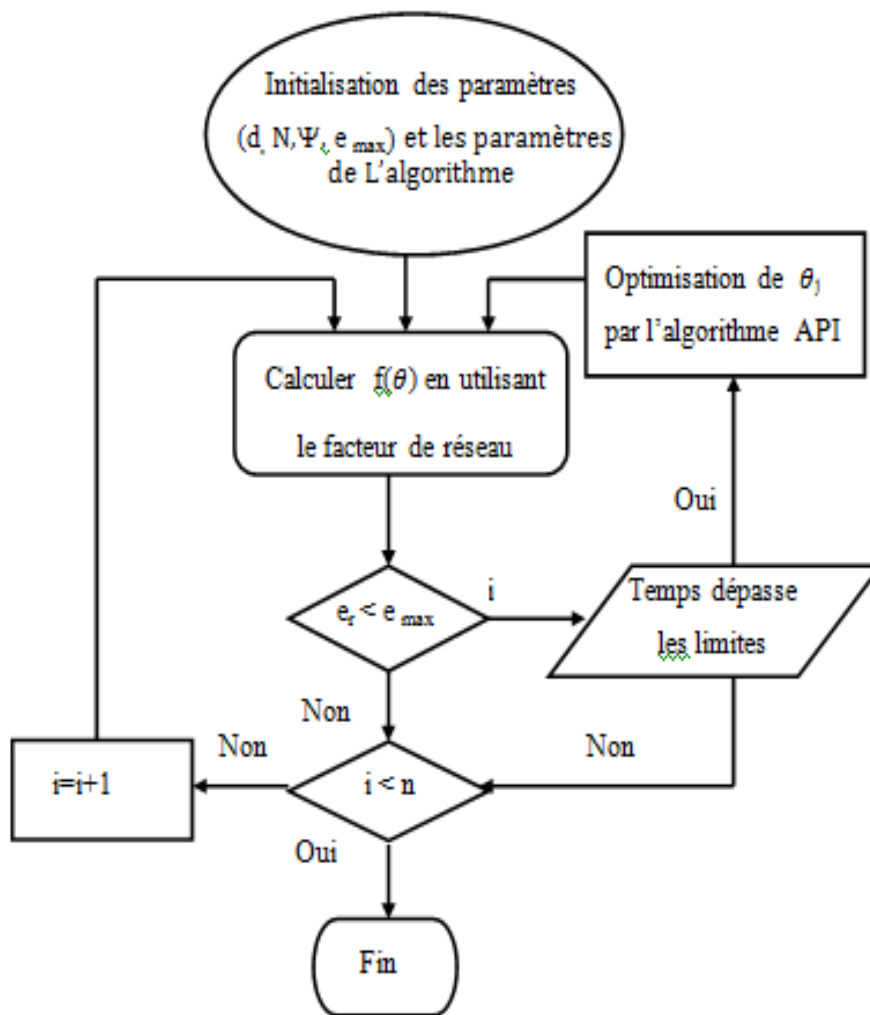
La stratégie de la méta-heuristique API (APIcalispachycondyla identification) est décrite par N. Monmarché. L'idée de base de cette méthode, que les fourmis utilisent des principes simples pour rechercher leurs proies.

- Les fourmis créent des sites de chasse au hasard à partir de leur nid.
- Chaque fourmi explore un espace de recherche local et global et évalue les meilleures solutions.

Nous avons transformé le problème d’identification des paramètres du réseau (distance entre élément rayonnants  $d$ , le déphasage  $\Psi$ ) à un problème d’optimisation dans le sens de minimiser la fonction objective (la fonction erreur entre le diagramme désiré et estimé)..

L’organigramme est exécuté à plusieurs reprises afin d’entraîner le système à optimiser les données d’entrées-sorties par l’algorithme méta-heuristique API.

La procédure principale de cette méthode est donnée par l'organigramme suivant:



**Figure III.2 : Méthode de l'optimisation par l'algorithm méta\_heuristique API**

L'organigramme est exécuté à plusieurs reprises afin d'entraîner le système à optimiser les données d'entrées-sorties par l'algorithm méta-heuristique API. L'algorithm fonctionne jusqu'à ce que tous les paramètres cessent de changer ou changent très peu sur une série de pas d'itérations. Ceci indique que la valeur de l'erreur est réduite au minimum, ainsi l'algorithm a trouvé un minimum et il peut être terminé. Les paramètres seront réinitialisés si la recherche du minimum n'aboutit pas au bout d'un certain temps.

Résultats de simulations

La figure III.3 présente l'évolution de la directivité en fonction du déphasage  $\Psi$ , le nombre d'éléments rayonnants  $N=16$  et la distance entre deux éléments adjacents  $d=0.0137$ .

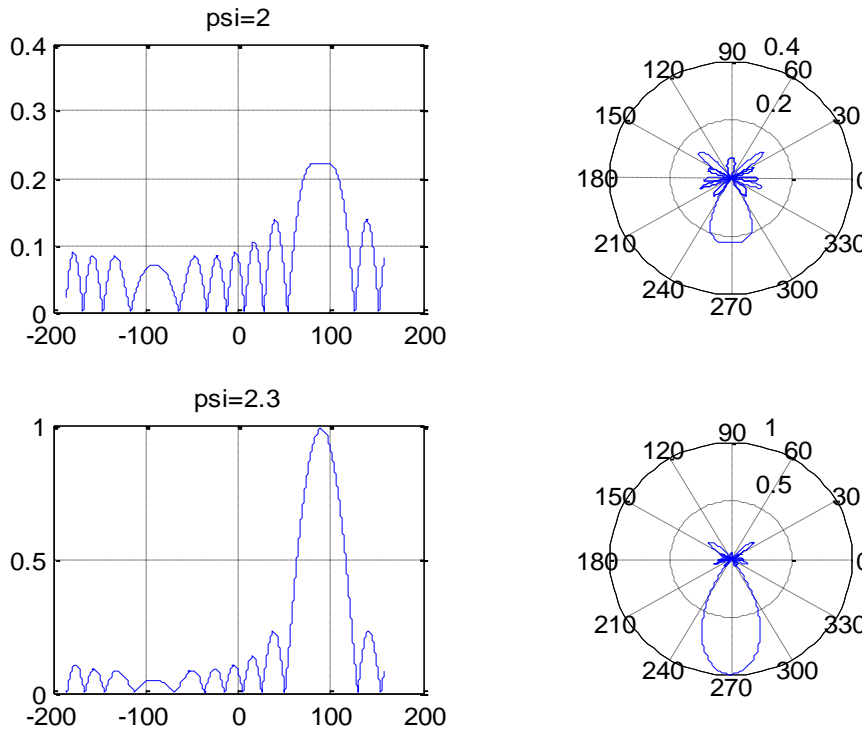


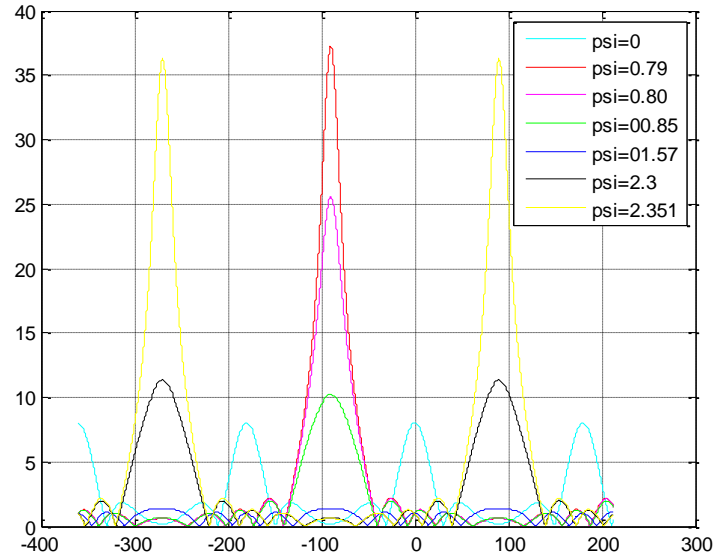
Figure III.3 Evolution de la directivité en fonction du déphasage  $\Psi$  ( $N=16, d=0.0137$ )

Si  $\Psi=2$  On remarque que l'amplitude du lobe principal est diminuée avec une augmentation de l'amplitude des lobes secondaire indésirable

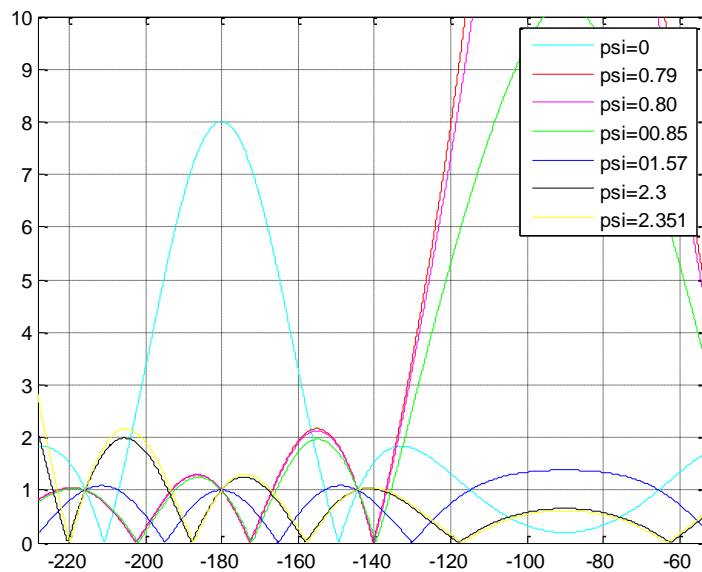
Pour  $\Psi=2,3$  le gain du lobe principal augmente et les lobes secondaires deviennent plus petits.

La figure III.4 nous donne le diagramme de rayonnement en fonction du déphasage entre les éléments rayonnant de l'antenne.

Nous pouvons trouver différentes courbes en modifiant la valeur de  $\Psi$  entre ces éléments rayonnants du réseau d'antenne (Nous avons pris le nombre d'éléments rayonnant  $N=16$  et la distance entre deux éléments adjacents  $d=0.0137$ ).



a)

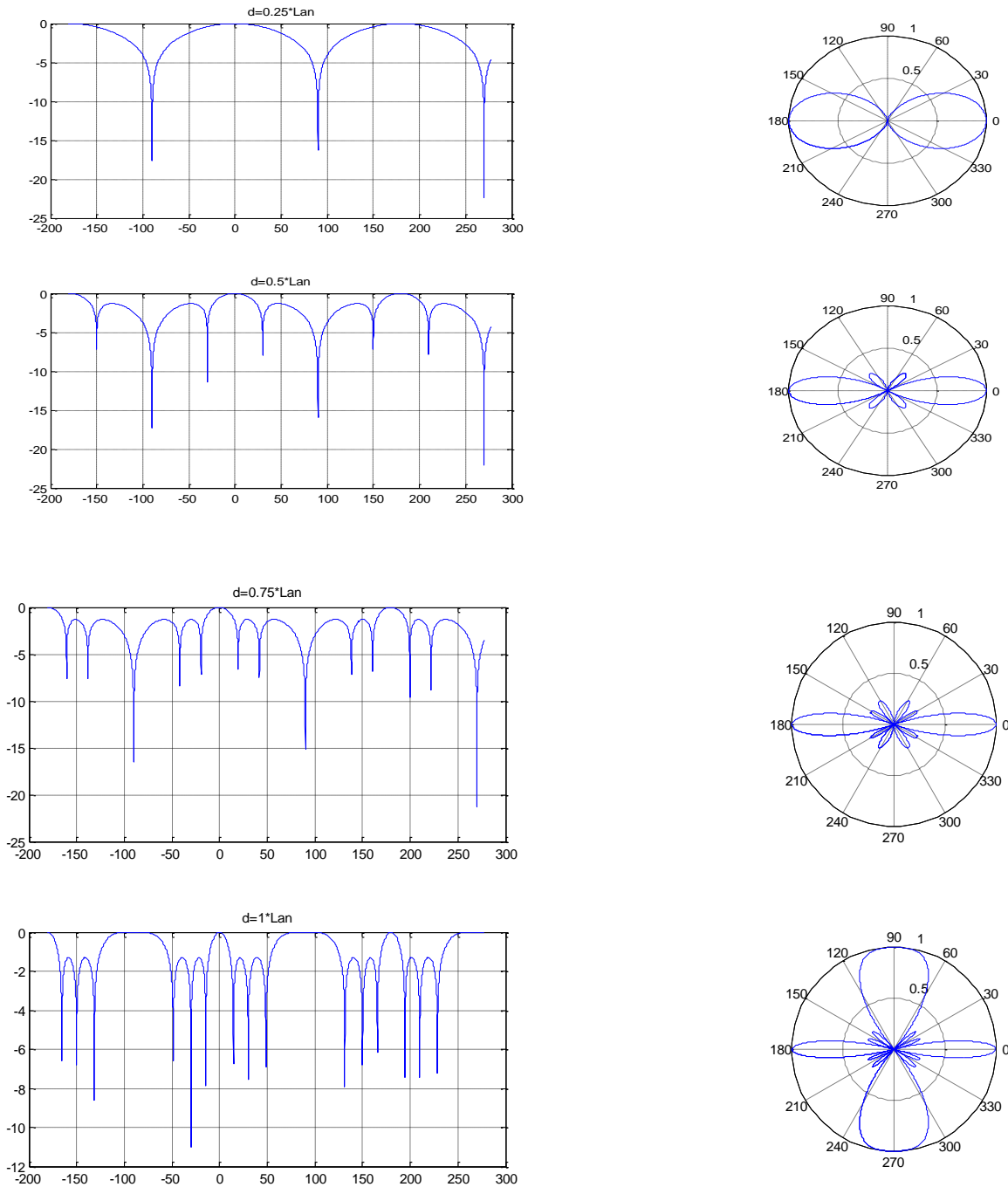


b)

**Figure III.3 : Evolution de la directivité en fonction du déphasage  $\Psi$  ( $N=16, d = 0.0137$ )**

La figure III.3 illustre le diagramme de rayonnement d'un réseau de  $N=16$  éléments, espacés de  $d=0.0137$ , on peut constater que pour  $\Psi=0$  le diagramme de rayonnement est suivant  $\theta=-\pi/2$ , le lobe principal est relativement étroit, on peut constater aussi que le gain est relativement plus fort pour une valeur de  $\Psi \neq 0$ .

La directivité du diagramme dépend à la fois de l'espacement entre les éléments rayonnants, de l'amplitude de et de la phase du courant alimentant de chaque élément.



**Figure III.4 : Evolution de la directivité en fonction de la distance  $d$  ( $d=0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda$  et  $\lambda$ ) entre deux éléments adjacents ( $N=4, \Psi=0$ )**

En augmentant la valeur de  $d$ , on peut remarquer clairement que le nombre des lobes secondaires augment avec un abaissement de la puissance de ces lobes, et on observe également que le lobe principal devient plus étroit et par ailleurs on peut constater que la directivité augmente.

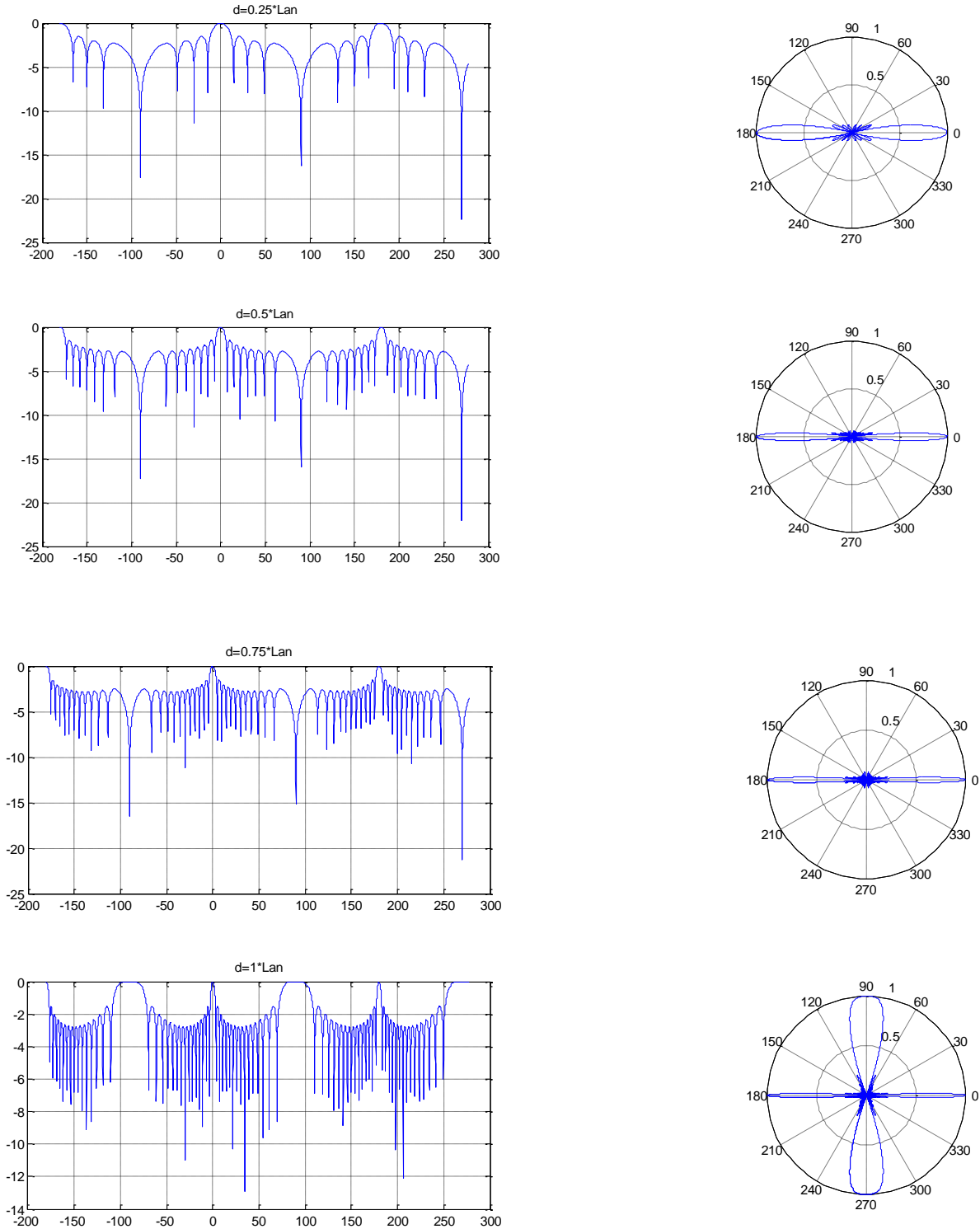


Figure III.5 : Evolution de la directivité en fonction de la distance  $d$  entre deux éléments adjacents ( $N=16, \Psi=0$ ).

En agissant sur ces paramètres, on peut obtenir une grande variété de diagrammes. Cependant, pour obtenir des gains et des directivités plus importants, il faut utiliser des réseaux ayant plus de deux éléments.

Ces réseaux sont la solution la plus économique pour obtenir des diagrammes directifs.

Dans La figure III.5, on constate que le maximum de directivité est atteint au voisinage de  $d = 0.7 \lambda$  : c'est la distance qu'il faudra chercher à atteindre lors de la réalisation de réseaux directifs.

On peut constater également que un abaissement des lobes secondaires, avec pour contrepartie, un élargissement du lobe principal, ce qui revient à une diminution de la directivité. un abaissement de l'ensemble des lobes secondaires à des niveaux très faibles nécessite l'utilisation de méthodes d'optimisation appropriées : c'est un des objectifs de la synthèse de réseau.

### **III.4-Application de l'algorithme API**

Dans cette partie, nous donnons des résultats de simulation pour montrer l'évolution du diagramme de rayonnement qui peut être observé dans le réseau afin d'identifier les paramètres  $d$  et  $\Psi$  avec l'application de l'approche API.

Les valeurs des paramètres de l'algorithme l'API utilisés sont : Le nombre de fourmis  $a_i = 10$ , le nombre de sites de chasse pour chaque fourmi  $S = 8$ .  
L'algorithme API qui modélise le comportement de fourrage d'une population de fourmis primitives (*Pachycondyla apicalis*).

#### **L'algorithme API**

- (1) Choisir aléatoirement l'emplacement initial du nid :  $N \leftarrow \text{Orand}$
- (2)  $T \leftarrow 0$  /\*indice du nombre d'itérations\*/
- (3) Tant que la condition d'arrêt n'est pas vérifiée faire
- (4)     Pour tout  $a_i \in A$  faire
- (5)         API-FOURRAGEMENT ( $a_i$ )
- (6)     Fin pour
- (7)     Si le nid doit être déplacé alors
- (8)          $N \leftarrow s+$  /\*meilleure solution atteinte\*/
- (9)     Vider la mémoire de toutes les fourmis

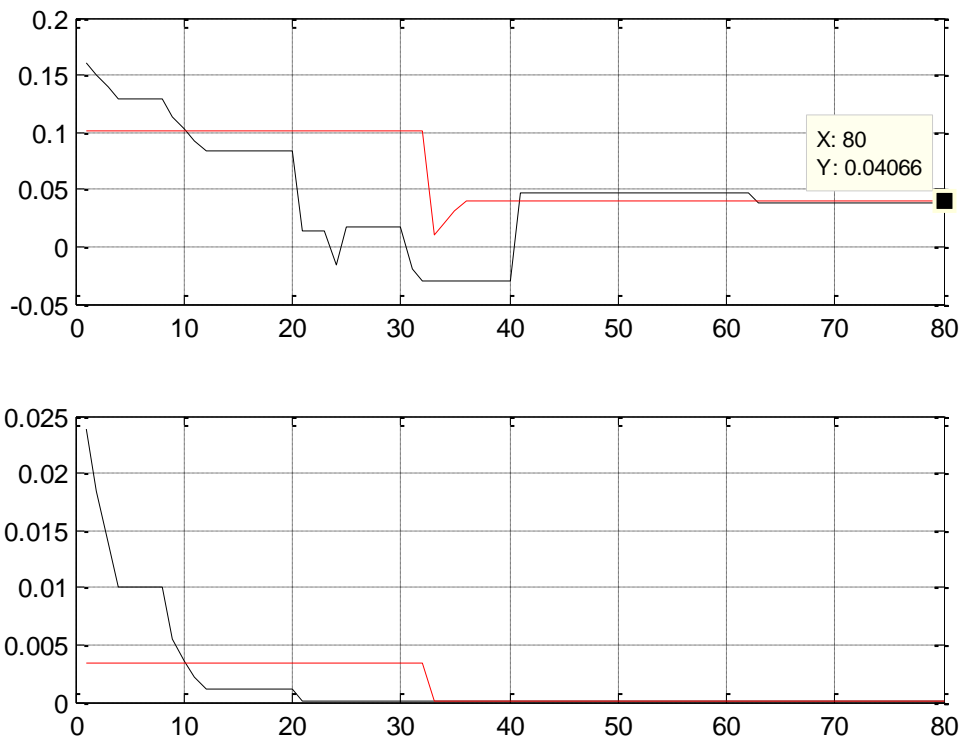
- (10) Fin si
- (11)  $T \leftarrow T + 1$
- (12) Fin Tant que
- (13) Retourner  $s^+$  et  $f(s^+)$

Le comportement local de fourragement d'une fourmi est donné par l'algorithme (API Fourragement ) suivant :

- (1) Si  $nc(ai) < p$  alors
  - \*La mémoire de la fourmi n'est pas pleine\*
- (2)  $nc(ai) \leftarrow nc(ai) + 1$
- (3) Construction d'un site de chasse autour du nid :
  - $snc(ai) \leftarrow O_{explo}(N, Acite)$
- (4) Initialisation du compteur d'échecs du site construit :  $enc(ai) \leftarrow 0$
- (5) Sinon
- (6) Soit  $s_j$  le site que la fourmi a exploré à sa dernière sortie
- (7) Si  $e_j > 0$  alors
  - \* la dernière exploration de  $s_j$  a été infructueuse\*
- (8) Choisir aléatoirement un site  $s_j$  de chasse ( $j \in \{1, \dots, p\}$ )
- (9) Finsi
- (10) Exploration locale autour du site  $s_j$ :  $su \leftarrow O_{calo}(s_j, Alecale)$
- (11) Si  $f(su) < f(s_j)$  alors
- (12)  $s_j \leftarrow su$
- (13)  $e_j \leftarrow 0$
- (14) Sinon
- (15)  $e_j \leftarrow e_j + 1$
- (16) Si  $e_j > P_{locale}$  alors
- (17) Effacer le site  $s_j$  de la mémoire de la fourmi
- (18)  $nc(ai) \leftarrow nc(ai) - 1$
- (19) Finsi

Fin si

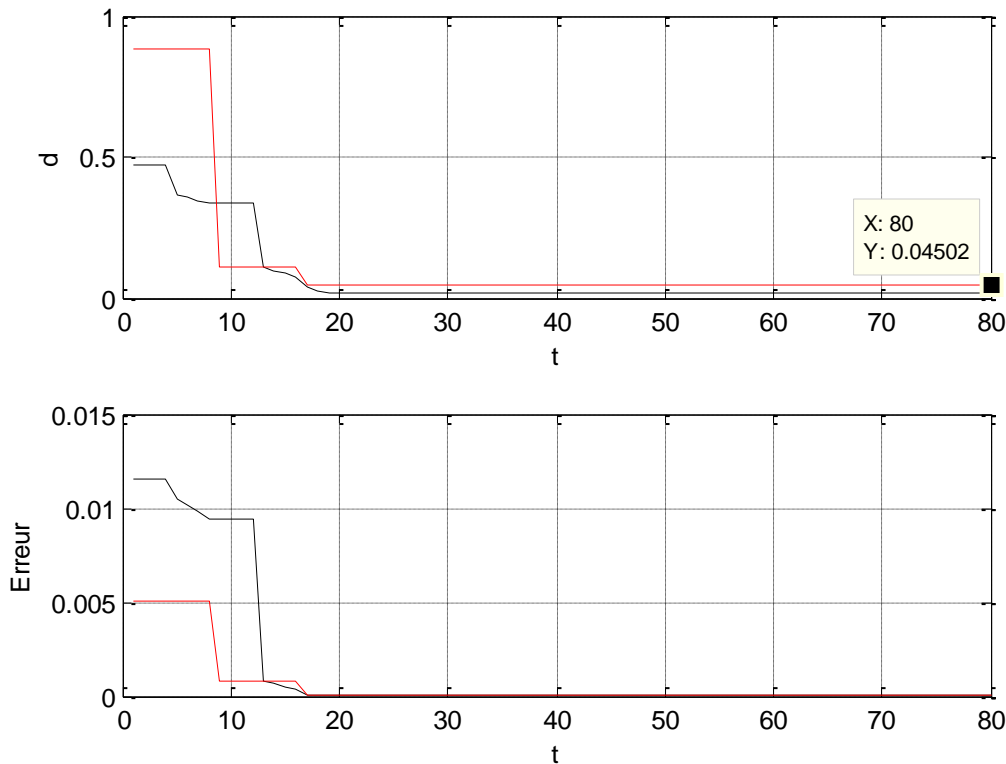
La figure III.6 et III.7 présentent l'optimisation de la valeur de la distance entre élément ' d ' pour que la fonction objective (l'erreur) tend vers 0 afin d'optimiser le diagramme de rayonnement.



**Figure III.6 : La valeur de la distance 'd' en utilisant l'algorithme API  
 $N=16$ ,  $\lambda=0.0566$  m et  $\Psi=0$**

Cette figure montre bien la convergence de l'algorithme vers une valeur bien défini et par ailleurs La fonction objective (l'erreur) tend vers 0.

Pour obtenir des gains plus élevés et des directivités plus grandes, il est nécessaire d'utiliser l'identification des paramètres par algorithmes rapprochés dits méta-heuristiques permettant d'obtenir une grande variété de diagrammes pour n'importe quel réseau d'antennes.



**Figure III.7 : La valeur de la distance 'd' en utilisant l'algorithme API  
 $N=16$ ,  $\lambda=0.0566$  m et  $\Psi=2.3$**

Chaque paramètre a une influence sur le comportement de l'algorithme, donc il faut bien choisir et tester le programme plusieurs fois afin d'avoir la fonction objective tendre vers 0 et la valeur identifiée donner une meilleure optimisation.

### III.5-Conclusion

Le contrôle des paramètres du réseau permet d'obtenir une grande variété de diagrammes azimutaux, même pour un simple réseau à deux éléments. Cependant, pour obtenir des gains plus élevés et des directivités plus grandes, il est nécessaire d'utiliser une optimisation.

Ce travail est basé sur le concept d'identifier et d'optimiser le diagramme de rayonnement par l'algorithme d'optimisation méta-heuristique API. Les résultats de la simulation montrent la simplicité, la performance et l'efficacité de l'algorithme méta heuristique API pour l'identification et l'optimisation du diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes et nous encourage à les utiliser pour l'optimisation d'autres types d'antennes.

---

# *Conclusion générale*

---



### Conclusion générale

Le diagramme de rayonnement d'une antenne reste fixe et immobile. Pour obtenir un diagramme de rayonnement variable on utilise un réseau d'antennes. La valeur optimale d'un paramètre du réseau permet d'obtenir un diagramme de rayonnement optimisé avec des niveaux de lobes secondaires très bas et un diagramme de rayonnement voulu.

Ces réseaux sont généralement composés d'un élément actif (alimenté par la base ou par le centre) et d'un ou plusieurs éléments passifs convenablement espacés entre eux. La directivité horizontale souhaitée dépend de la position des éléments rayonnants.

Les méthodes de résolution exactes permettent d'obtenir une solution dont l'optimalité est garantie, dans certaines situations, on peut cependant chercher des solutions de bonne qualité, sans garantie d'optimalité, mais au profit d'un temps de calcul plus réduit. Pour cela, l'application des méthodes méta-heuristiques inspirés de la nature et adaptées à chaque problème traité. Cependant l'inconvénient de ces méthodes est de ne disposer en retour d'aucune information sur la qualité des solutions obtenues.

Les méta-heuristiques exploitent généralement des processus aléatoires dans l'exploration de l'espace de recherche et en plus de cette base stochastique, les méta-heuristiques sont des méthodes itératives, ainsi le même processus de recherche est répété lors de la résolution.

Dans ce travail, Nous avons présenté une optimisation d'un diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes par l'algorithme API (pachycondyla apicalis algorithme) afin d'augmenter la directivité des antennes et réduire le niveau des lobes secondaires.

L'utilisation de l'algorithme API nous a permis d'optimiser la distance  $d$  entre éléments de réseau d'antennes. Les résultats obtenus sont très intéressants.

Le choix de la fonction d'optimisation reste un choix délicat car cette dernière représente le paramètre clé de la convergence vers une solution optimale.

Nous pouvons donc en conclure que:

- Les méta-heuristiques sont des bonnes stratégies pour se disposer intelligemment dans l'espace des solutions, afin d'obtenir une solution, la meilleure possible
- L'objectif d'une méta-heuristique, est de garantir à trouver le paramètre optimum. Pour cela, l'idée est à la fois de se déplacer dans l'espace de recherche, et d'explorer les zones qui peuvent être attirantes ; mais sans être piégé par les optima locaux.

## Conclusion générale

---

- Les méta-heuristiques sont souvent inspirées de processus naturels et sont de plus en plus hybridées avec d'autres méthodes de recherche.

Ce travail est un thème qui ouvre la recherche sur plusieurs types d'antennes et la variation de la différence de phase entre éléments rayonnants.

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. . Ces méthodes peuvent être efficaces pour Optimiser les systèmes de télécommunication.

---

# ***BIBLIOGRAPHIE***

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Odile Picon, Collectif - Les antennes \_ Théorie, conception et applications-Dunod (2009)
- [2] [Http://www.infcom.rnu.tn/content/pdf/cours/aline-saidane/chapitre1-generalies-sur-les-antenne](http://www.infcom.rnu.tn/content/pdf/cours/aline-saidane/chapitre1-generalies-sur-les-antenne), consulté le 18/10/2014 a 16:58.
- [3] Alexandre Boyer ,Antennes ,2011 ; disponible sur : <http://blog.f6krk.org/wp-content/uploads/2011/12/Generalite-sur-les-antennes.pdf>
- [4] Guellil .N, Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS.Momentum.
- [5] ChorfiH,C conception d'un nouveau système d'antenne réseau conforme en onde millimétrique, Mémoire ,Univ du Québec 2012, disponible sur : <http://depositum.uqat.ca/491/1/hamidchorfi.pdf>
- [6] Mammeri Saliha, Kabtan Salim, étude et simulation d'une antenne réseau en radiocommunication, Dirigé par : Mammeri Fouzia, Mémoire de fin d'études, université de kenchela, 2014,52p.
- [7] Gross, F.B., *Smart antennas for wireless communications: with MATLAB*. 2005, New York: McGraw-Hill. xiv, 270 p.
- [8] B Barkat.o, Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique, thèse de doctora, Univ de Constantine 2009.
- [9] Kenaoui. K, Optimisation d'un réseau d'antennes (ILS) par l'algorithme d'abeilles, thèse de Master, Univ de Boumerdes 2016.
- [10] **Merad L et al**, Conception de réseaux d'antennes imprimées par les algorithmes génétiques et le recuit simulé Microstripantennasarray Design Using Genetic algorithms and Simulated Annealing. traitement du signal 2004\_volume 21\_numéro 3.
- [11] Johann Dréo. Adaptation de la méta-heuristique des colonies de fourmis pour l'optimisation difficile en variables continues. Application en génie biologique et médical. Université Paris XII Val de Marne, 2003.
- [12] Maamri fouzia Contribution à la modélisation et à l'identification des systèmes chaotiques par les méta-heuristiques Méthodes méta-heuristiques - Stabilité par la méthode de Lyapunov THÈSE Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Univ OEB. 20219.
- [13] Peio Loubiere. Amélioration des métaheuristiques d'optimisation à l'aide de l'analyse de sensibilité.. Université Paris-Est, 2016.
- [14] Monmarché. N. Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation. Université François Rabelais - Tours, 2000.
- [15] Fresneau, D. (1985). Individualforaging and pathfidelity in a ponerineant .InsectesSociaux,

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Paris, 32(2) :109–116.
- [16] Fresneau, D. (1994). Biologie et comportement social d'une fourmi pour méénéotropical (Pachycondylaapicalis) .Thèse d'état, Université de Paris XIII, Laboratoire d'Ethologie Expérimentale et Comparée., France.1994.
- [17] Holldobler, B. and Wilson, E. (1990). The Ants. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [18] Colorni, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V. \_\_ An investigation of some properties of an “Ant algorithm. (1992).
- [19] Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J., and Pasteels, J. Self-OrganizedShortcuts in the Argentine Ant. 1989.
- [20] N. Monmarche, G. Venturini, and M. Slimane, On how pachcondylaapicalis ants suggest a new search algorithm, Fut. Gen. Comput. Syst, vol. 16, pp. 937–946, 2000.
- [21] I.H. Osman, G. Laporte. Metaheuristics: a bibliography. Ann Oper Res. Vol 63, pp: 513–623. 1996.
- [22] S. Kirkpatrick, Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies, Journal of Statistical Physics, vol. 34, pp. 975-986. 1984.