

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DÉPARTEMENT D'AÉRONAUTIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur
D'Etat En Aéronautique*

Spécialité : Navigation Aérienne

Option : Installation

THÈME

*Optimisation par Essaim de Particules (OEP)
du diagramme de rayonnement d'un réseau
d'antennes*

Présenté Par :

- BENZAID Fouad

- BENSIKHALED Abdelhak

Encadré Par :

- Mr : BENOURED Abdelhalim

Année universitaire : 2009 / 2010

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

On remercie DIEU le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nos sincères reconnaissances pour notre promoteur Mr. Benouared pour l'aide qu'il nous a apporté durant la réalisation de ce travail.

On tient à remercier, et exprimer notre respect aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail, qu'il trouve ici l'expression de notre infinie gratitude et l'assurance de notre haute considération.

On remercie nos chers parents qui nous ont beaucoup aidés.

On remercie toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumés

ملخص :

خوارزمية التحسين بحشد من الوحدات هي خوارزمية مقتبسة من التصرف الاجتماعي لحيوانات تنشط في حشد واحد, مثل سرب من الطيور المهاجرة أو سرب من السمك, الوحدات في نفس الحشد تتصل فيما بينها بكيفية مباشرة طويلة فترة البحث من أجل إيجاد حل للمشكلة المطروحة و ذلك بالارتكاز على خبرتهم الجماعية .

الهدف من عملنا هذا هو استعمال طريقة التحسين هذه من أجل تحسين مخطط إشعاع شبكة من الهوائيات, وذلك في حالة شبكة موحدة غير عشوائية. في النهاية سنعمل مقارنة مع طريقة تشيبي تشاف الكلاسيكية.

Résumé:

L'algorithme d'OEP s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les oiseaux migrateurs ou les poissons. Les particules d'un même essaim communiquent de manière directe entre elles tout au long de la recherche pour construire une solution au problème posé, en s'appuyant sur leur expérience collective.

L'objectif de notre travail consiste à utiliser cette méthode d'optimisation afin de synthétiser le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes, et cela dans le cas des réseaux uniformes, non uniformes et les réseaux quelconques. A la fin nous allons faire une comparaison avec les méthodes classiques telles que la méthode de Tchebychev.

Abstract:

PSO algorithm is inspired from the social behavior of animals living in swarm, such as bird flocks or fish schools. The particles of the swarm use a direct way of communication in order to build a solution to the considered problem, based on their collective experience. In our work, we will use this method to optimize antenna array.

The objective of our work consists to use this method of optimization in order to synthesize the diagram of radiation of antennas network, and this in the uniform, no uniform and unspecified networks. In the end, we will make a comparison with the traditional methods such as the method of Tchebychev.

TABLE DES MATIERES

Résumé

Liste des figures

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralité sur les antennes.

I.1 Introduction.....	2
I.2 Rayonnement électromagnétique.....	2
I.2.1 Equations de Maxwell	2
I.3 Les antennes	4
I.3.1 Définition	4
I.3.2 Classification des antennes	4
I.4 Caractéristiques d'une antenne	6
I.4.1 Directivité	6
I.4.2 Gain en puissance et rendement ..	6
I.4.3 Diagramme de rayonnement	7
I.4.4 Polarisation d'une antenne	9
I.4.5 Surface effective d'une antenne en réception	10
I.5 Equation de transmission	10
I.6 Les antennes réseaux	11
I.7 Définition et Principe de Fonctionnement de ILS.....	11
I.7.1 Localiser (LOC)	13
I.7.2 GLIDE PATH (Alignement de descente)	13
I.7.3 MARKERS (Radio balise à rayonnement vertical)	17
Conclusion.....	17

Chapitre II : Synthèse du diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne

II.1 Introduction	18
II.2 Les réseaux d'antennes	18
II.2.1 Polarisation du réseau	19
II.2.2 Effets du couplage	20
II.2.3 Effets du déphasage	20
II.2.4 Facteur de réseau	20
II.2.5 Réseaux linéaires uniformes	23
a/ Effet du nombre d'antenne.....	23
b/ Effet de la position des sources	25
II.2.6 Réseaux non uniformes.....	27
a/ Synthèse par la méthode binomial	28
b/ Synthèse par la méthode de Dolph-Tchebychev.....	29
II.3 Quelques méthodes d'optimisation des réseaux d'antennes	32
II.3.1 processus d'optimisation	32

II.3.2 Principe général des réseaux de neurones	34
II.3.3 Principe général du recuit simulé.....	35
II.3.4 Principe général de l'Algorithme Génétique	35
II.4 Réseau d'antenne du Localiser	36
II.4.1 Etude du digramme de rayonnement	36
Conclusion.....	40

Chapitre III : Optimisation par essaim de particules (OEP).

III.1 Introduction	41
III.2 Principe général de la méthode.....	42
III.3 Formalisation mathématique de la méthode.....	43
III.4 Paramètres importants de l'OEP.....	45
III.4.1 Nombre de particules.....	45
III.4.2 Le voisinage.....	46
III.4.3 Coefficient de confiance.....	47
III.4.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction.....	47
III.4.5 Facteur d'inertie.....	48
III.5 Déroulement de l'algorithme.....	49
III.6 Exemple d'application.....	53
Conclusion.....	58

Chapitre IV : Simulation et résultats.

IV.1 Introduction	59
IV.2 Notion de gabarit	59
IV.2.1 Définition	59
IV.3 Applications	60
IV.3.1 Application 1 : réseau uniforme.....	62
IV.3.2 Application 2 : réseau non uniforme.....	69
IV.3.3 Application 3 : réseau quelconque.....	72
IV.3.4 Comparaison de l'OEP avec la méthode de Tchebychev.....	76
Conclusion.....	77

Conclusion générale.....	78
---------------------------------	-----------

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Fig. I.1 : Onde TEM.....	2
Fig. I.2 : Antennes en émission et en réception.....	4
Fig. I.3 : Types d'antennes	5
Fig. I.4 : Diagramme d'une antenne directive en trois dimensions.....	8
Fig. I.5 : Diagramme d'une antenne directive en coordonnées polaires.....	8
Fig. I.6 : Diagramme d'une antenne directive en coordonnées cartésiennes	8
Fig. I.7 : Ouverture mi-puissance	9
Fig. I.8 : Les différentes polarisations d'une antenne	9
Fig. I.9 : Liaison radio.....	10
Fig. I.10 : Les différentes séquences d'une procédure de précision.....	12
Fig. I.11 : Schéma de localisation des trois principaux sous système de ILS.....	13
Fig. I.12 : Disposition du Glide par rapport à la piste.....	14
Fig. I.13 : L'allure du champ reçu par le récepteur en fonction de l'angle de site.....	15
Fig. I.14 : Le schéma synoptique de l'équipement de bord.....	16
Fig. I.15 : Le schéma synoptique de l'équipement de bord.....	17

Chapitre II :

Fig. II.1 : Réseau plan 5x5 à éléments « patch ».....	19
Fig. II.2 : Champ lointain de deux dipôles.....	21
Fig. II.3 : Configuration d'un réseau uniforme de N sources isotrope.....	23
Fig. II.4 : Effet du nombre d'éléments sur le diagramme de rayonnement.....	24
Fig. II.5 : Comparaison entre les trois diagrammes.....	25
Fig. II.6 : Effet de la distance sur le diagramme de rayonnement.....	26
Fig. II.7 : Exemple de l'effet des paramètres de synthèse (N, d) sur le diagramme de rayonnement.....	27
Fig. II.8 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 8 éléments.....	30
Fig. II.9 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 11 éléments.....	31
Fig. II.10 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 20 éléments.....	31
Fig. II.11 : Processus d'optimisation.....	33
Fig. II.12 : L'allure du digramme de rayonnement des antennes LOC.....	37
Fig. II.13 : Diagramme de rayonnement du LLZ 1F.....	39
Fig. II.14 : Diagramme de rayonnement du LLZ 2F.....	39
Fig. II.15 : Antenne LLZ 1F.....	40
Fig.II.16 : Antenne LLZ 2F (à large ouverture, 21 éléments).....	40

Chapitre III :

Fig. III.1 : formation optimale d'un groupe d'oiseaux et de poisson.....	42
Fig. III.2 : Schéma de principe du déplacement d'une particule en PSO.....	43
Fig. III.3 : Schéma vectorielle du déplacement d'une particule.....	45

Fig. III.4 : les topologies du voisinage d'un essaim.....	47
Fig. III.5 : Organigramme du PSO.....	52
Fig. III.6 : Cas d'un nombre de particules insuffisant.....	54
Fig. III.7 : Cas d'un facteur d'inertie très grand.....	55
Fig. III.8 : Cas d'un espace de recherche vaste.....	56
Fig. III.9 : Cas où les paramètres de contrôle sont assez réglés.....	57

Chapitre IV :

Fig. IV.1 : Gabarit défini sur toute la sphère d'observation.....	59
Fig. IV.2 : Gabarit en puissance défini sur toute la sphère d'observation.....	60
Fig. IV.3 : Gabarit du Localiser.....	61
Fig. IV.4 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.5\lambda$, $N = 8$	62
Fig. IV.5 : Evolution de la fonction fitness.....	62
Fig. IV.6 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.5\lambda$, $N = 12$	63
Fig. IV.7 : Evolution de la fonction fitness.....	63
Fig. IV.8 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.5\lambda$, $N = 20$	64
Fig. IV.9 : Evolution de la fonction fitness.....	64
Fig. IV.10 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 8$	65
Fig. IV.11 : Evolution de la fonction fitness.....	66
Fig. IV.12 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 12$	66
Fig. IV.13 : Evolution de la fonction fitness.....	67
Fig. IV.14 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 20$	67
Fig. IV.15 : Evolution de la fonction fitness.....	68
Fig. IV.16 : Diagrammes de rayonnement pour $I_P = 1$, $N = 8$	69
Fig. IV.17 : Evolution de la fonction fitness.....	69
Fig. IV.18 : Diagrammes de rayonnement pour $I_P = 1$, $N = 12$	70
Fig. IV.19 : Evolution de la fonction fitness.....	70
Fig. IV.20 : Diagrammes de rayonnement pour $I_P = 1$, $N = 20$	71
Fig. IV.21 : Evolution de la fonction fitness.....	71
Fig. IV.22 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 8$	72
Fig. IV.23 : Evolution de la fonction fitness.....	73
Fig. IV.24 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 12$	73
Fig. IV.25 : Evolution de la fonction fitness.....	74
Fig. IV.26 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 20$	74
Fig. IV.27 : Evolution de la fonction fitness.....	75
Fig. IV.28 : Diagrammes de rayonnements pour $N = 8$, optimisés par PSO et Tchebychev	76

Introduction générale

Dans le domaine des réseaux d'antennes, le problème de synthèse consiste à estimer les variations d'amplitude et de phase de l'alimentation et la répartition spatiale des éléments rayonnants qui permettent de fournir un diagramme de directivité aussi proche que possible d'un diagramme désiré. Le but de l'étude est donc de rechercher la combinaison optimale de ces différents paramètres afin que le réseau réponde aux besoins de l'utilisateur. Pour cela, de nombreux outils déterministes de synthèse ont été développés (Fourier, Dolph-Tchebycheff, on, Newton, gradient conjugué, etc) [2]. Compte tenu de la diversité des buts recherchés par les utilisateurs, on ne trouvera pas une méthode générale de synthèse applicable à tous les cas, mais plutôt un nombre important de méthodes propres à chaque type de problème.

Récemment, des techniques générales stochastiques et d'optimisation globale sont apparues, capables d'obtenir un minimum global et sans rester piéger dans un minimum local comme dans le cas des méthodes déterministes [4][7].

Les méthodes globales sont plus robustes face à des problèmes mal conditionnés en particulier par des contraintes sur les paramètres et par des minima locaux. Par contre, elles peuvent demander un temps de calcul plus important.

Dans notre travail, nous étudions l'une de ces méthodes stochastiques, qui est l'optimisation par essaim de particules, pour ce, on a choisi la structure suivante :

- Le premier chapitre a pour but de donner une présentation générale des antennes et de leurs caractéristiques.
- Dans le deuxième chapitre, on présentera les réseaux d'antennes, ainsi que la nature des paramètres à synthétiser. On s'intéressera également aux spécifications et exigences du diagramme de rayonnement du Localizer.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la méthode d'optimisation par essaim de particules (OEP). Nous décrivons les paramètres et les différentes étapes de l'algorithme avec des exemples démonstratifs de l'influence du réglage de ces paramètres sur la précision des résultats obtenus.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous allons exposer les résultats de synthèse par action sur les lois d'alimentation et de répartition spatiale pour que le diagramme de rayonnement du réseau soit aussi proche que possible d'un diagramme désiré optimal (diagramme du Localizer).

Chapitre I :

Généralités sur les

antennes

I.1 Introduction :

Dans ce premier chapitre, nous rappellerons quelques notions générales sur la propagation des ondes électromagnétiques, puis nous décrirons un certain nombre des caractéristiques importantes des antennes. A la fin nous allons donner une description du système ILS, car, comme nous l'avons déjà cité dans l'introduction générale, le but de notre mémoire est d'optimiser un réseau d'antennes de Localiazer qui fait partie de ILS, donc nous allons expliquer le principe de fonctionnement de ce système ainsi que chaque partie qui le constitue.

I.2 Rayonnement électromagnétique :

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} . Dans le vide, ces deux champs sont orthogonaux et transverses (perpendiculaires à la direction de propagation): c'est une onde dite TEM (Transverse Electromagnétique).

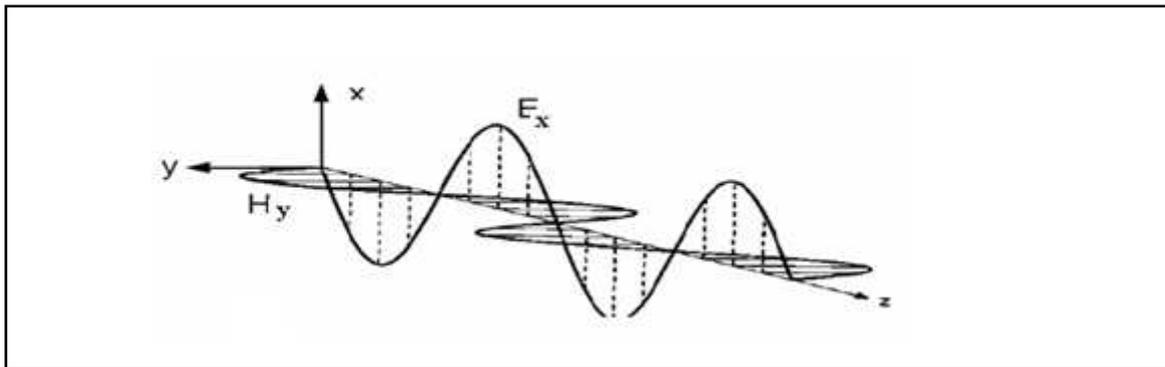


Fig. I.1 : Onde TEM

Les équations de Maxwell tiennent une grande importance dans les antennes, car l'étude des ondes électromagnétiques se fait à l'aide de ces équations, et que d'elles dérivent leurs propriétés.

I.2.1 Equations de Maxwell :

Les équations de Maxwell relient les champs $\vec{E}(\mathbf{r})$, $\vec{H}(\mathbf{r})$, le déplacement électrique \vec{D} , le flux magnétique \vec{B} , la densité de courant \vec{J} et la densité volumique de charges électrique ρ .

Elles s'écrivent :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (\text{Loi de Faraday}) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\vec{D} + \vec{J} \quad (\text{Loi d'Ampère-Maxwell}) \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Loi de Gauss}) \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Loi de Gauss}) \quad (4)$$

Avec :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -j\omega\rho \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (7)$$

Dans le vide $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9}$ F/m est la permittivité électrique et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m est la perméabilité magnétique. On a : $1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans le vide, en l'absence de courant et de charge, et en remplaçant l'équation (6) dans l'équation (2), et l'équation (7) dans l'équation (1), on obtient :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon_0 \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad (9)$$

Et en développant l'équation (7) par l'équation (4), et l'équation (6) par l'équation (3), on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (11)$$

Les équations (8), (9), (10) et (11) qui sont les équations de Maxwell, montrent que toutes variations temporelles du champ électrique \vec{E} induit une variation spatiale du champ magnétique \vec{H} , et de même toutes variations temporelles du champ magnétique \vec{H} induit une variation spatiale du champ électrique \vec{E} . Il ne peut donc pas avoir de propagation seule de l'un des champs \vec{E} ou \vec{H} , c'est pourquoi l'on parle d'onde électromagnétique.

La résolution des équations de Maxwell dans le vide conduit aux deux équations d'onde suivantes [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \vec{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \end{array} \right. \quad (13)$$

Une solution générale de ces équations a la forme suivante :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (13)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (14)$$

La vitesse d'une onde électromagnétique dans le vide est égale à la vitesse de lumière, soit:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.10^8 \text{ m/s}$$

La densité de puissance rayonnée par l'onde se calcule à partir de la valeur réelle du vecteur de Poynting :

$$P(r, \theta, \varphi) = \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}\} \quad (\text{W/m}^2) \quad (15)$$

I.3 Les antennes :

I.3.1 Définition :

Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre une source et l'espace libre dans lequel 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 [2]. Généralement, la source d'émission (ou le récepteur) est reliée à l'antenne par une ligne de transport d'énergie qui est fréquemment une ligne coaxiale ou un guide d'ondes. (Figure I.2).

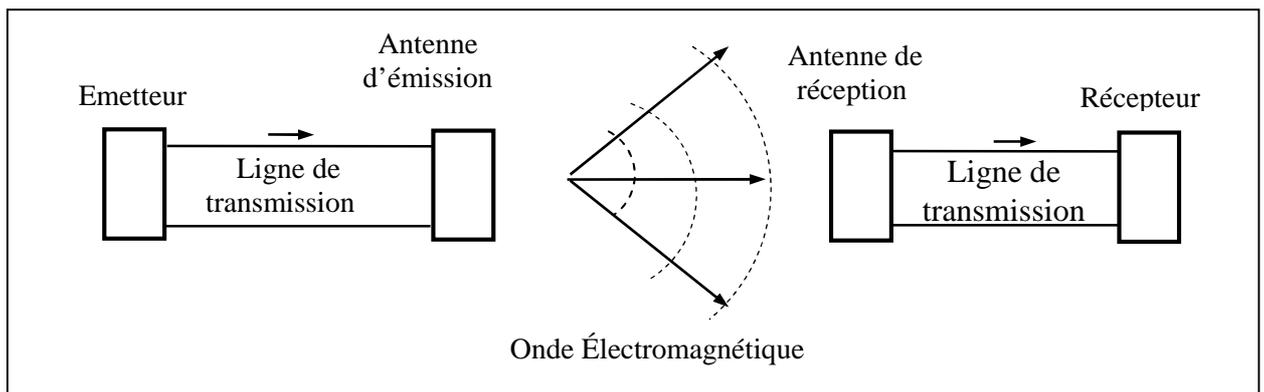


Fig. I.2 : Antennes en émission et en réception

I.3.2 Classification des antennes :

Il existe un grand nombre de types d'antennes [1]. Elles peuvent être classifiées de différentes manières (figure I.3):

- **Selon les formes ou les géométries :**
 - Antennes filaires : dipôle, boucle, spirale
 - Antennes d'ouverture : cornet, fente
 - Antennes imprimées : patch, dipôle imprimé, spirale
- **Selon le gain :**
 - Gain élevé : plat
 - Gain moyen : cornet
 - Gain faible : dipôle, boucle, fente, patch
- **Selon les formes de faisceau :**
 - Omnidirectionnel : dipôle
 - Faisceau de crayon : plat
 - Faisceau de fan : rangée
- **Selon la largeur de bande :**
 - Bande large : hélix
 - Bande étroite : patch

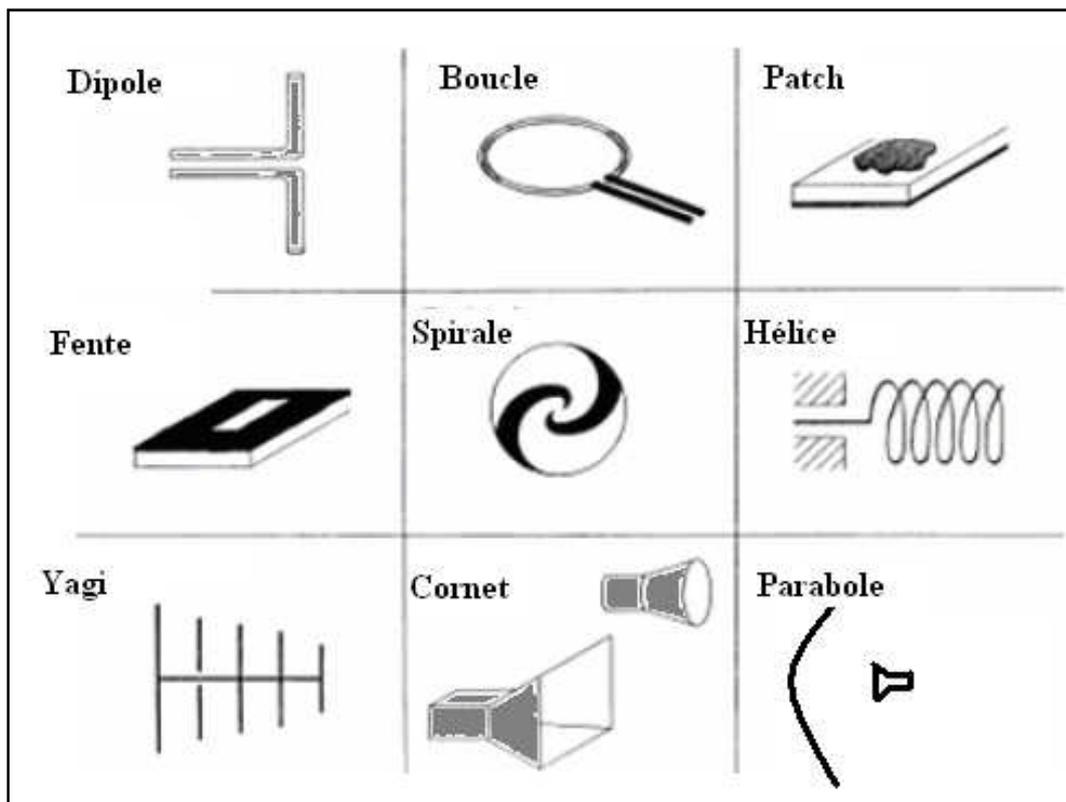


Fig. I.3 : Types d'antennes

I.4 Caractéristiques d'une antenne :

Les caractéristiques d'intérêt d'une antenne [3] sont :

- Directivité et gain.
- Efficacité.
- Diagramme de rayonnement.
- Ouverture du faisceau.
- Polarisation.
- Largeur de bande.

I.4.1 Directivité :

La directivité (parfois appelée gain directionnel) d'une antenne est définie comme le rapport de la densité de puissance surfacique $P(r, \theta, \varphi)$ rayonnée par l'antenne et la densité de puissance surfacique P_{iso} rayonnée par l'antenne isotrope. L'antenne isotrope est une antenne fictive émettant la même puissance dans toutes les directions.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(r, \theta, \varphi)}{P_{iso}} \quad (16)$$

Qui peut aussi s'écrire :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi r^2 P(r, \theta, \varphi)}{P_T} \quad (17)$$

P_T étant la puissance totale rayonnée par l'antenne, et r la distance.

La directivité indique dans quelles directions la densité de puissance est meilleure ou moins bonne que celle de l'antenne isotrope.

I.4.2 Gain en puissance et rendement :

Le *gain* se définit de la même manière que la directivité mais en tenant compte des pertes, c'est-à-dire en remplaçant la puissance rayonnée par la puissance fournie P_F à l'antenne :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi r^2 P(r, \theta, \varphi)}{P_F} \quad (18)$$

Le rendement d'une antenne est défini ainsi :

$$\eta = \frac{G(r, \theta, \varphi)}{D(r, \theta, \varphi)} = \frac{P_T}{P_F} (< 1) \quad (19)$$

Le gain en puissance dépend de la fréquence du signal émis. Il est très faible aux basses fréquences mais atteint des valeurs de 75% à 95% pour des fréquences supérieures à 1 MHz.

On utilise surtout le gain maximal $G = \max[G(\theta, \varphi)]$

Les plus grands gains sont obtenus avec des antennes paraboliques (20 à 60 dB).

Attention : Une antenne est un élément strictement passif qui n'amplifie pas le signal. Son gain, par définition, représente la concentration de puissance dans une direction privilégiée par rapport à une antenne isotrope sans pertes.

On déduit la densité de puissance maximale d'une antenne par rapport à la puissance fournie P_F :

$$P(r, \theta, \varphi) = G \frac{P_F}{4\pi r^2} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (20)$$

De fait, le gain en puissance d'une antenne est un paramètre plus intéressant que sa directivité; en effet, comme le rendement η est inclus, on peut calculer la densité de puissance en introduisant directement la valeur de la puissance fournie P_F .

I.4.3 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est la distribution spatiale d'une grandeur qui caractérise le champ électromagnétique rayonné par l'antenne. Cette distribution peut être exprimée sous forme d'une fonction F ou d'une représentation

graphique du rapport des gains en puissance $r(\theta, \varphi) = \frac{G(\theta, \varphi)}{G_{\max}}$, Parfois, c'est tout simplement

la représentation du gain $r(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi)$ lui-même. On utilise aussi le diagramme champ

[2] en remplaçant le gain par le champ électrique $F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{E_{\max}} = \sqrt{r(\theta, \varphi)}$.

Les grandeurs généralement utilisées sont proportionnelles à :

- La densité de flux de puissance.
- L'amplitude, la phase ou la polarisation du champ électrique.

On distingue :

- Le diagramme en amplitude ou en champ, si c'est l'amplitude ou l'amplitude relative qui est représentée.
- Le diagramme en puissance (le plus utilisé), si c'est le carré de l'amplitude ou de l'amplitude relative qui est représenté.

Il existe de différents types de représentation du diagramme de rayonnement :

- Représentation en trois dimensions qui donne une idée de la répartition de la puissance rayonnée dans l'espace (figure I.4)
- Représentation en coordonnées polaires dans des plans choisis, (figure I.5)
- Représentation en coordonnées cartésiennes (échelle linéaire).
- Représentation en coordonnées cartésiennes (échelle logarithmique) : cette échelle est habituellement souhaitable parce qu'une échelle logarithmique peut accentuer les détails des parties du diagramme qui ont des valeurs très basses (figure I.6).

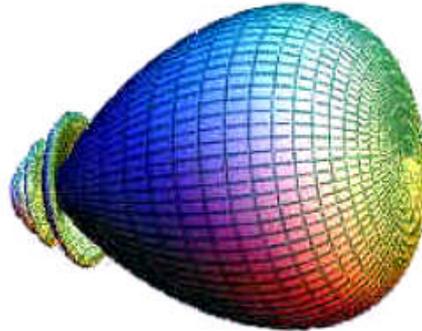


Fig. I.4 : Diagramme d'une antenne directive en trois dimensions

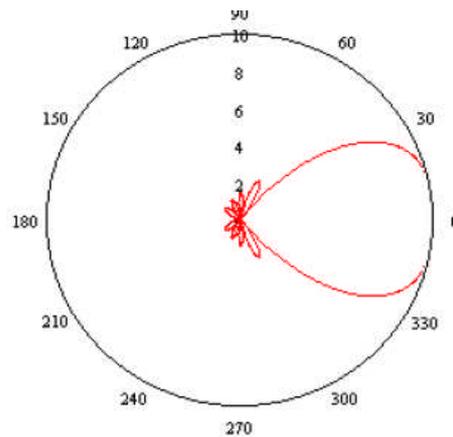


Fig. I.5: Diagramme d'une antenne directive en coordonnées polaires

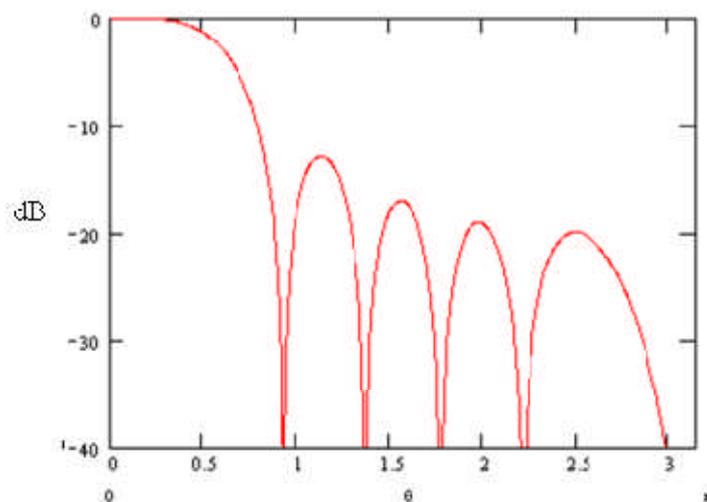


Fig. I.6 : Diagramme d'une antenne directive en coordonnées cartésiennes

Généralement dans un plan donné, le diagramme de rayonnement d'une antenne directive comprend un lobe principal, et des lobes secondaires qui sont indésirables.

La plus grande partie de la puissance rayonnée est contenue dans un cône d'ouverture HPBW (Half Power Beam Wide) défini à mi-puissance, ce qui correspond à une chute de 3 dB par rapport à la puissance maximale ou à un champ max divisé par $\sqrt{2}$. (Figure I.7)

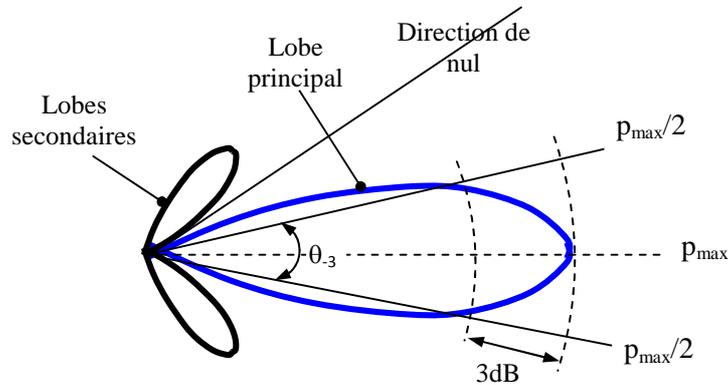


Fig. I. 7 : Ouverture mi-puissance

I.4.4 Polarisation d'une antenne :

La polarisation d'une antenne dans une direction donnée est définie comme « la polarisation de l'onde transmise (rayonnée) par l'antenne, c'est-à-dire de la direction du champ électrique émis par l'onde. Quand la direction n'est pas énoncée, la polarisation est prise pour être la polarisation dans la direction du gain maximum ». Dans la pratique, la polarisation de l'énergie rayonnée varie avec la direction de l'antenne, de sorte que les différentes parties du diagramme puissent avoir différentes polarisations.

Les antennes peuvent émettre des ondes à polarisation (Figure I.8):

- Linéaire : le champ électrique conserve une direction constante.
- Circulaire : l'extrémité du champ électrique décrit un cercle lors de sa propagation.
- Elliptique : l'extrémité du champ électrique décrit une ellipse lors de sa propagation.

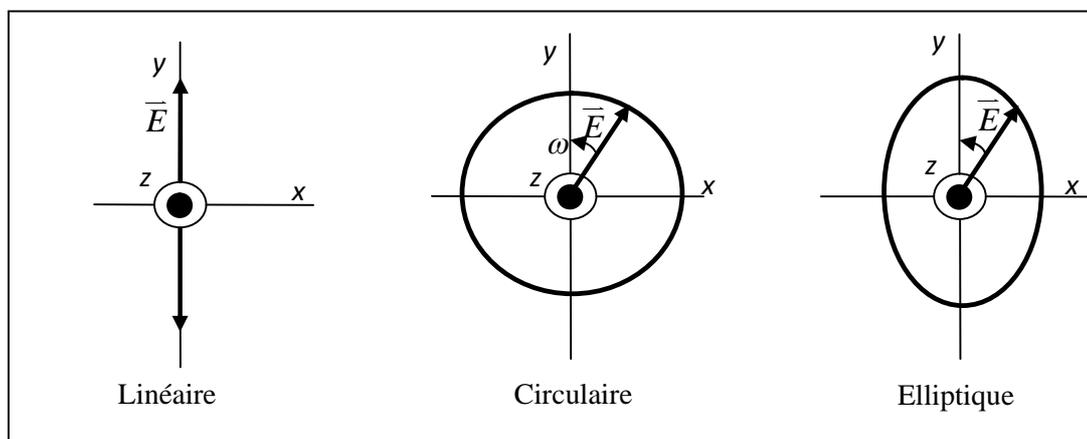


Fig. I.8 : Les différentes polarisations d'une antenne

I.4.5 Surface effective d'une antenne en réception :

A chaque antenne, nous pouvons associer une surface effective. Celle-ci est employée pour calculer la puissance captée par une antenne.

La surface effective (ou équivalente) A_e d'une antenne dans une direction donnée est définie comme « le rapport de la puissance disponible sur les bornes de l'antenne en réception P_{rec} à la puissance de l'onde plane incidente $P(r, \theta, \varphi)$ sur l'antenne dans cette direction :

$$A_e = \frac{P_{rec}}{P(r, \theta, \varphi)} \quad (\text{m}^2) \quad (21)$$

La surface effective de n'importe quelle antenne est reliée à son gain max G par la relation importante :

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (\text{m}^2) \quad (22)$$

λ étant la longueur d'onde du signal émis par l'antenne.

Cette relation découle du théorème de réciprocité qui stipule qu'une antenne en émission conserve les mêmes caractéristiques en réception.

I.5 Equation de transmission :

L'équation de transmission relie la puissance captée P_{rec} en fonction des caractéristiques de la liaison émetteur-récepteur (figure 1.9):

$$P_{rec} = P_F G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (\text{W}) \quad (23)$$

Où

P_F : la puissance fournie à l'antenne d'émission

G_E : gain de l'antenne d'émission

G_R : gain de l'antenne de réception

r : la distance entre l'émetteur et le récepteur

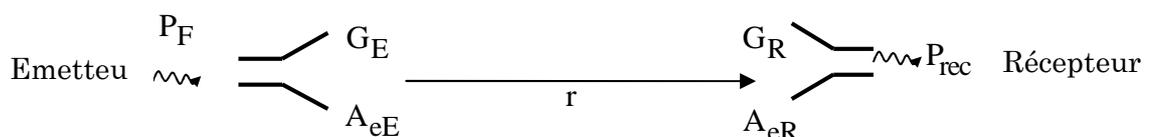


Fig. I.9 : Liaison radio

Notons que cette équation ne tient pas compte des effets de désadaptation des antennes, ni des pertes atmosphériques.

I.6 Les antennes réseaux :

Les antennes réseaux sont constituées par un ensemble de sources élémentaires alimentées par des voies séparées. Ces sources sont souvent des cornets ou des fentes rayonnantes ou des éléments imprimés ou même des dipôles [1]. Un dispositif d'alimentation, appelé en français « réseau d'alimentation des sources » et en anglais *Beamforming network* permet de commander les amplitudes et les phases relatives de ces sources. Grâce à cette commande des sources en amplitude et en phase, les antennes réseaux peuvent produire des diagrammes de rayonnement ayant une forme voulue. Il sera notamment possible de les conformer localement.

Les réseaux seront étudiés en détail dans le deuxième chapitre.

I.7 Application et Principe de Fonctionnement de ILS :

Le système d'atterrissage aux instruments I.L.S. (Instrument Landing System) est utilisé par les avions qui exécutent des approches finales de précision. Il est constitué par un ensemble d'émetteurs radioélectriques, qui émettent dans la direction de la trajectoire d'approche finale. Le signal émis n'est pas le même dans toutes les directions, il est fonction de l'azimut et du site de la direction d'émission.

L'avion en approche est équipé d'un récepteur qui analyse le signal reçu et en déduit l'azimut et le site de sa position par rapport à ceux de la trajectoire nominale d'approche finale, ce qui permet au pilote de savoir s'il est à droite ou à gauche de l'axe de la piste et s'il est au dessus ou en dessous du plan de descente, qui doit l'amener à se poser sur la piste. Le dispositif comprend aussi un système donnant au pilote une indication de distance à parcourir jusqu'à la piste.

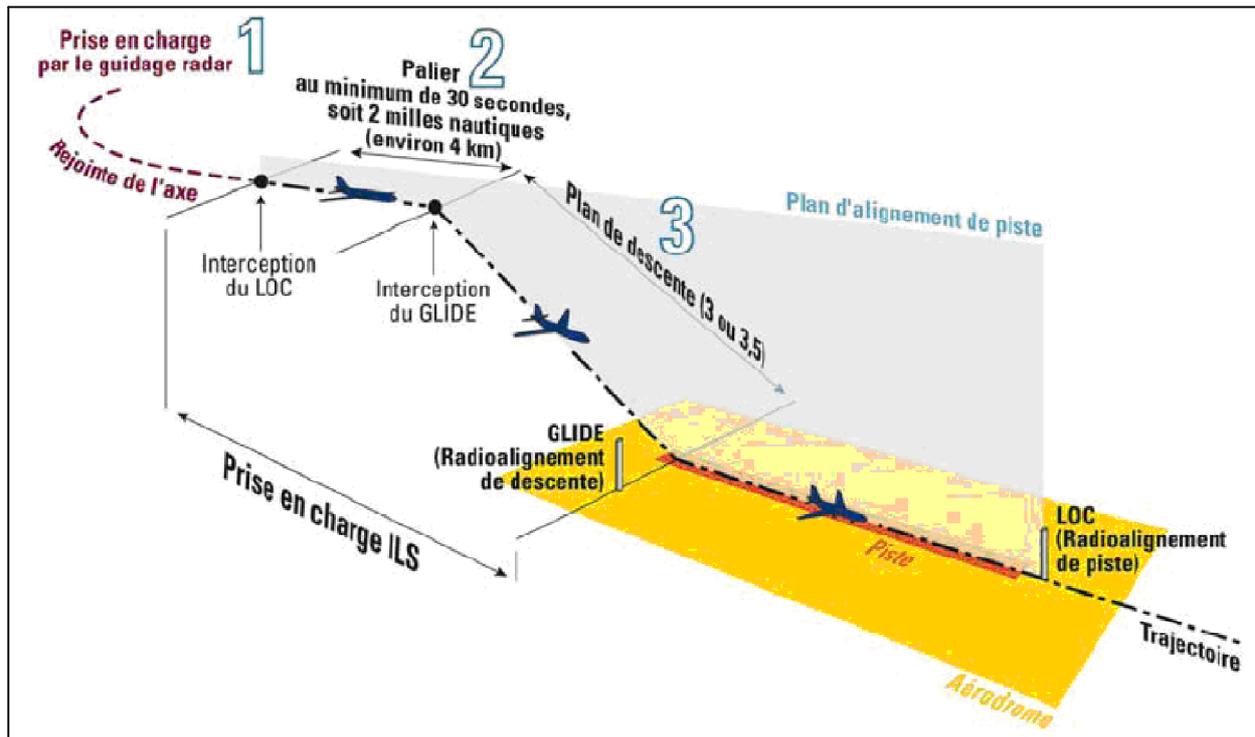


Fig. I.10 : Les différentes séquences d'une procédure de précision

La première balise est appelée LOCALIZER (LOC) et la seconde est appelée GLIDE. L'information des deux balises est centralisée sur un seul cadran de visualisation afin de faciliter le travail au pilote, qui est assez délicat dans cette phase, sur les avions modernes, la représentation de l'ILS est couplée à celle de l'horizon artificiel, de la vitesse et de l'altitude sur un seul écran afin que le pilote puisse acquérir toutes les informations dont il a besoin en observant un seul instrument. L'information du localizer est donnée comme celle d'un VOR sur un OBS. L'écart latéral maximal dans lequel on reçoit une information est de 10° de chaque côté de l'axe de piste. Le cadran présente une butée à $2,5^\circ$ de chaque côté. Le LOC est directionnel : si la barre est à gauche du centre du cadran, l'axe de piste est à gauche de l'appareil. Afin de se trouver dans une direction proche de l'axe de piste le pilote utilise un VOR ou un radiocompas, Il n'utilise l'information du LOC que lorsque l'indicateur n'est plus en butée. L'information du glide est donnée suivant le même principe mais en utilisant une barre verticale. Si la barre est en dessous du centre du cadran, le bon plan de descente est en dessous de la position actuelle de l'avion. Le glide possède une butée à $0,5^\circ$ au dessus et en dessous du plan de descente idéal (incliné de $2,5^\circ$ par rapport à l'horizontale).

L'ILS est un instrument fiable et précis qui autorise des débits de circulation importants. Il peut être couplé à un pilote automatique. L'infrastructure nécessaire est peu coûteuse mais nécessite d'être calibrée régulièrement et n'est utilisable que pour une seule

piste et dans un seul sens. Les aéroports importants doivent donc s'équiper de 2 ILS par piste (un dans chaque sens).

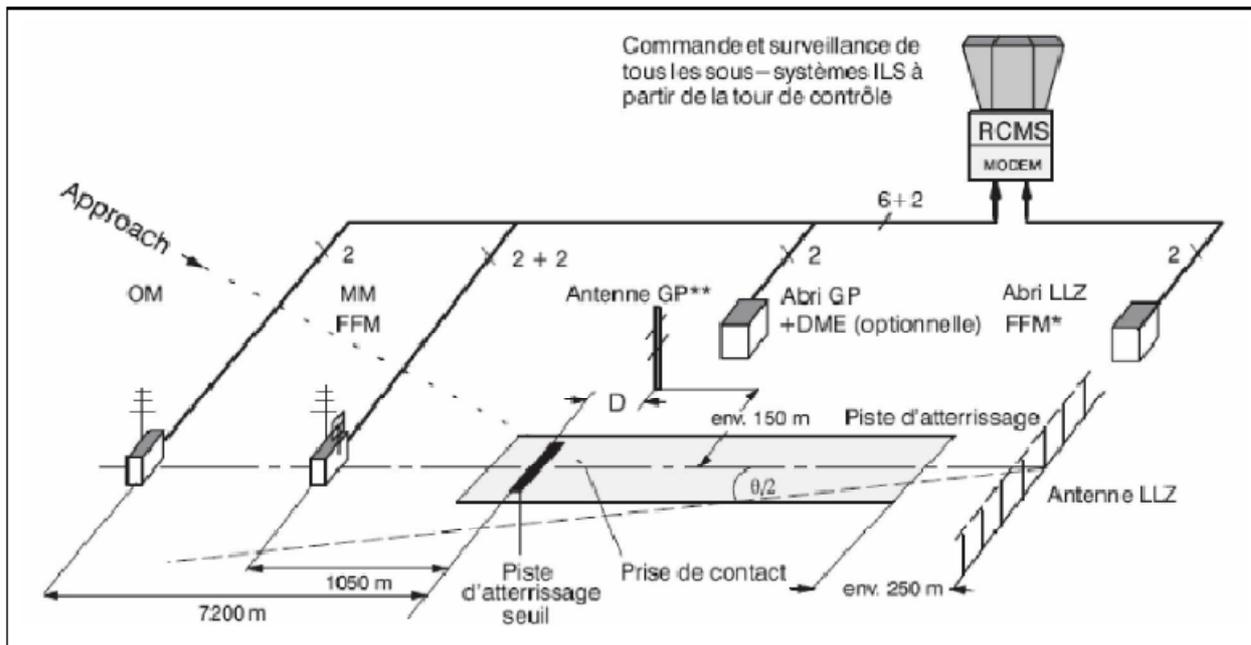


Fig. I.11 : Schéma de localisation des trois principaux sous système de ILS

I.7.1 Localiser (LOC) :

Le localiser est une aide à la navigation courte distance (approche et atterrissage), il fournit au pilote une information continue d'écart à un plan vertical contenant l'axe de piste. L'information est présentée à bord sur l'indicateur d'écart, centré lorsque l'avion est dans le plan vertical passant par l'axe de piste. Lorsque l'avion se présente au QFU de piste utilisée, le sens de déviation de l'aiguille (la barre de tendance vertical) indique le sens de la manœuvre à effectuer pour rejoindre l'axe. Le LOC fonctionne en VHF, dans la bande de 108 à 112 MHz (le principe de fonctionnement de cette partie sera étudié en détail dans le deuxième chapitre).

I.7.2 GLIDE PATH (Alignement de descente) :

Le GLIDE PATH est une aide à la navigation courte distance. Il fournit au pilote une information continue d'écart à un plan oblique contenant l'axe de descente. Il fonctionne en UHF dans la bande de 329 à 335 MHz, les fréquences de GLIDE sont appariées aux fréquences de LOC suivant un tableau de correspondance. Lors de l'utilisation de l'ILS il suffit d'afficher la fréquence de LOC, cette manœuvre entraîne automatiquement l'affichage de la fréquence GLIDE correspondante.

Un ensemble d'antennes directifs dans le plan vertical rayonne de façon différentes des porteuses modulées à 90 HZ et 150 HZ, le taux de modulation dépendant de la direction d'émission, la modulation à 90 HZ est prépondérante au-dessus du plan de descente ($m_{90} > m_{150}$) la modulation à 150 HZ est prépondérante au-dessous du plan de descente ($m_{150} > m_{90}$), Les deux taux de modulation sont égaux sur la plan de descente ($m_{90} = m_{150}$).

La différence des taux de modulation mesurée permet d'en déduire l'indication d'écart qui apparaît à bord (la barre de tendance horizontale).

Les antennes utilisées sont situées à 150 m de l'axe de QFU, et de 240 à 480 m de l'entrée de piste.

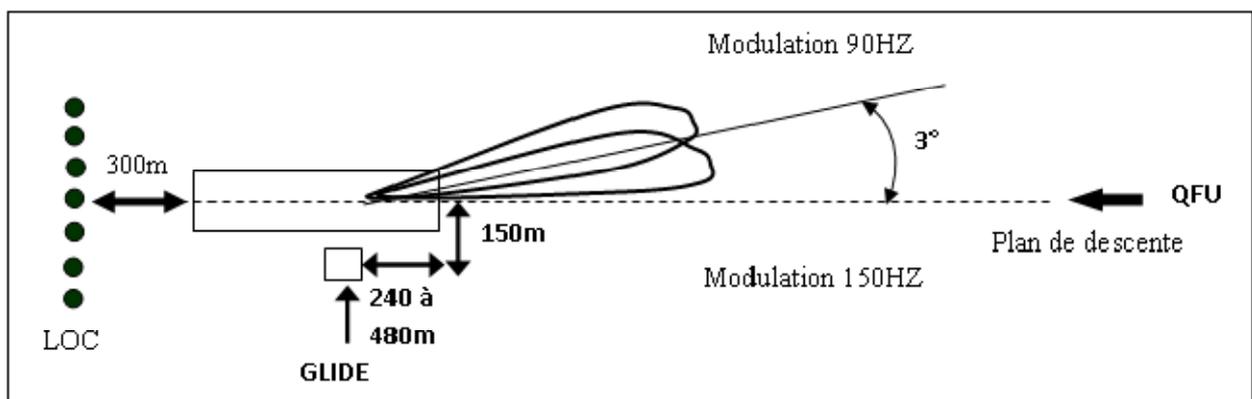


Fig. I.12 : Disposition du Glide par rapport à la piste.

Sur la figure (I.12), le plan de descente est représenté à 3° (cet angle de descente peut être différent). Pour obtenir des propriétés directives dans le plan vertical, on utilise 2 antennes horizontales au sol, l'antenne A_1 se trouve à $1,5 \lambda$ au-dessus du sol, elle est alimentée par la porteuse modulée à 90 HZ, l'antenne A_2 se trouve à $7,5 \lambda$ au-dessus du sol, elle est alimentée par la porteuse modulée à 150 HZ.

Un inconvénient important de ce type de glide est la non symétrie de part et d'autre par rapport au plan de descente, la barre est en butée pour une DDM de 0,175 ce qui correspond à $0,3^\circ$ au-dessous du plan de descente et $0,7^\circ$ en dessus. Cet inconvénient est corrigé dans le GLIDE nulle référence, où l'importance de la variation de pente due à la variation de la hauteur des antennes au dessus du sol est minimisée, comme il permet des variations symétriques de part et d'autre par rapport au plan de descente (la barre est en butée à $0,5^\circ$ de part et d'autre du plan), et cela est réalisé grâce à la disposition de deux antennes, une à 6λ au dessus du sol et l'autre à 12λ . Du fait que le système d'antenne n'est pas dans l'axe de la piste, une correction est nécessaire.

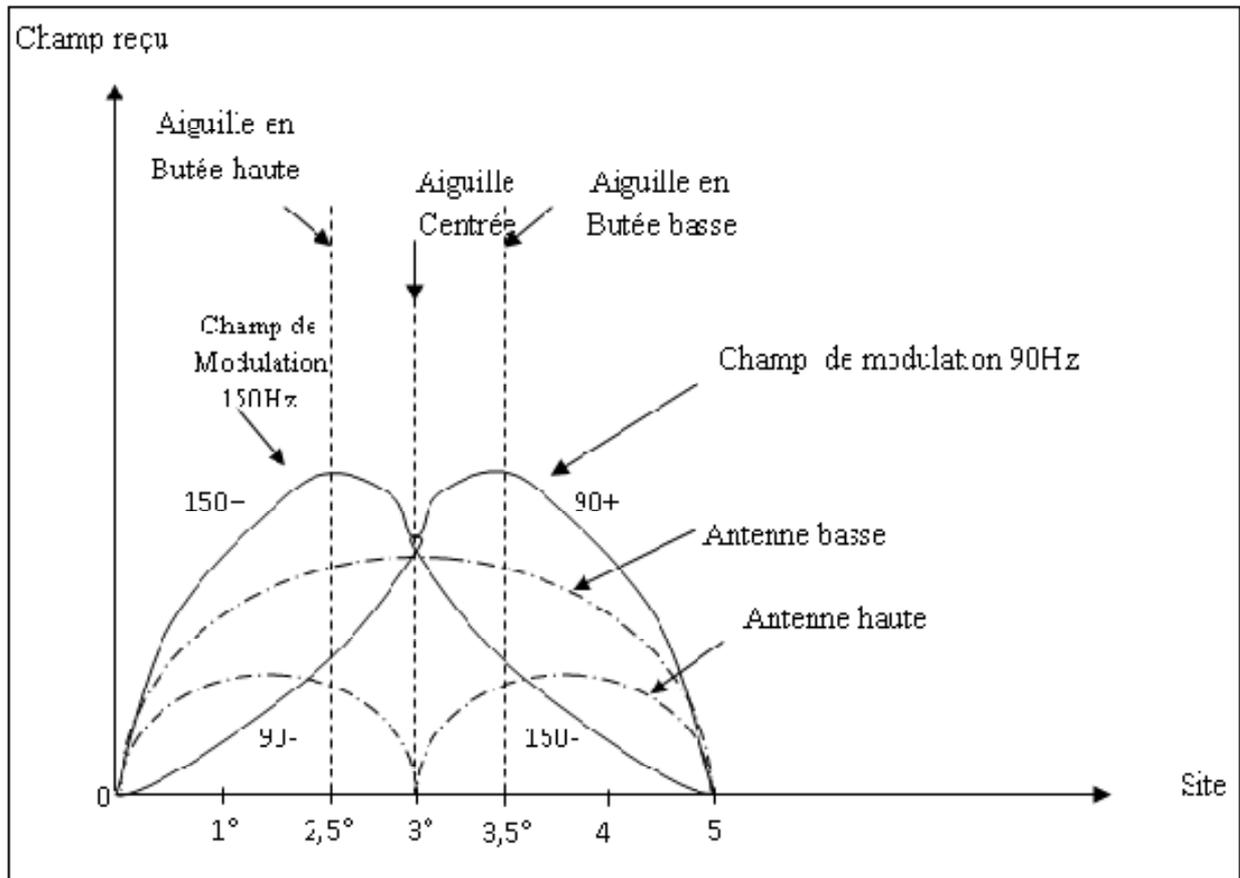


Fig. I.13 : L'allure du champ reçu par le récepteur en fonction de l'angle de site.

Nous pouvons constater sur la figure que :

- Les champs reçus sont égaux à 3° , la différence des deux taux de modulation est alors nulle.
- Le champ de modulation 90Hz est prédominant au dessus de 3° .
- Le champ de modulation 150Hz est prédominant en dessous de 3° .
- Pour un même écart angulaire de part et d'autre de 3° , la différence des champs reçus est la même, il y a même différence de taux de modulation ; les indications sont symétriques de part et d'autre 3° .

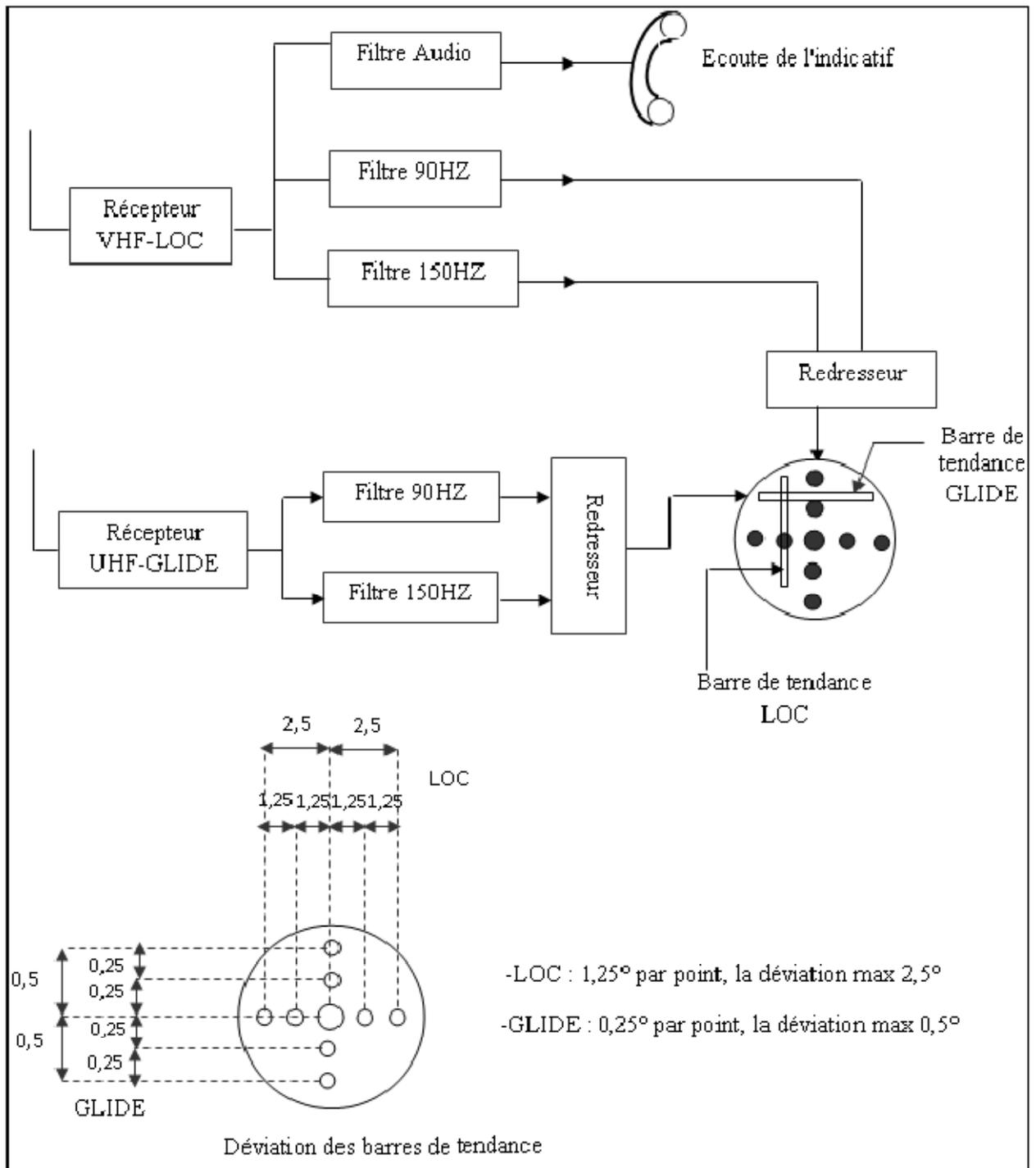


Fig. I.14 : Le schéma synoptique de l'équipement de bord.

I.7.3 MARKERS (Radio balise à rayonnement vertical) :

La localisation en distance par rapport à l'entrée de piste est obtenue au moyen de trois radiobalises à rayonnement vertical situées sur l'axe d'approche et en des lieux conventionnels.

Ces balises sont reçues à bord sur un récepteur spécial préréglé sur la fréquence de fonctionnement soit 75 Mhz.

Le passage de l'avion à leur verticale est matérialisé grâce à l'écoute de leur modulation respective des signaux de manipulation, et par l'allumage des lampes de signalisation de couleurs différentes.

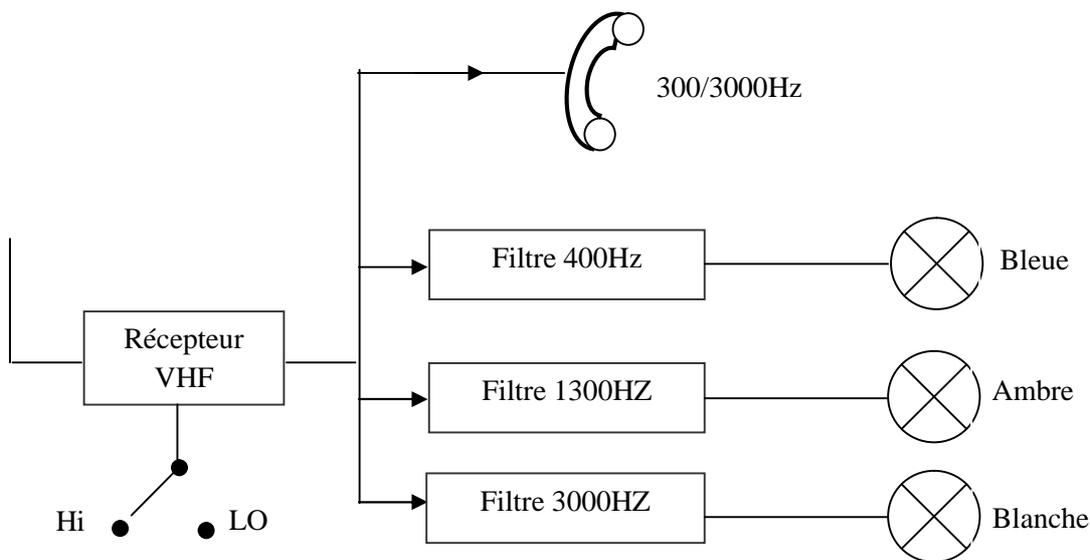


Fig. I.15 : Le schéma synoptique de l'équipement de bord.

Conclusion :

Nous avons développé dans ce chapitre certaines notions très importantes sur les antennes, comme le gain et le diagramme de rayonnement qui nous seront utiles dans la suite de notre travail. De même, nous avons vu l'importance des réseaux d'antennes pour concevoir des diagrammes de rayonnement précis tel que celui de l' ILS. Cette partie sera détaillée au prochaine partie.

Chapitre II :
Synthèse du diagramme
de rayonnement d'un
réseau d'antennes

II.1 Introduction :

La synthèse du diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes a pour objet de déterminer les caractéristiques d'un réseau d'antennes qui permettent de s'approcher au mieux des contraintes de rayonnement fixées (abaissement des lobes secondaires) ou d'un gabarit de rayonnement imposé. Cette synthèse consiste à trouver les excitations (les pondérations) ou les distances séparant les éléments pour que la fonction du diagramme de rayonnement réponde à des spécifications précises, pour cela le choix du type de réseau d'antenne et de la méthode d'optimisation est une étape importante.

Dans ce chapitre, nous allons énoncer quelques généralités sur les réseaux d'antennes rencontrés en pratique et leurs caractéristiques en donnant des exemples pour chaque cas, et les méthodes de synthèse du diagramme de rayonnement, en décrivant les paramètres qu'on utilise en vue de synthétiser un diagramme, avec des exemples démonstratifs.

A la fin, nous concluons ce chapitre par les spécifications et les exigences du diagramme de rayonnement du Localizer.

II.2 Les réseaux d'antennes :

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes élémentaires, disposées selon une géométrie particulière, et destinées à émettre ou à recevoir des fréquences.

Il existe une grande variété de réseaux :

- réguliers (les sources ou antennes élémentaires sont disposées avec un pas constant) ou irréguliers.
- linéaires : les sources sont alignées sur une droite.
- circulaires : les sources sont disposées sur un cercle.
- surfaciques : les sources sont disposées sur un plan, une sphère, un cylindre ou autre surface (on emploie aussi le mot « conformées »).
- volumiques : les sources sont réparties à l'intérieur d'un volume (une sphère par exemple).

L'avantage principal des réseaux d'antennes par rapport à une antenne simple est leurs capacités de balayage électronique et du contrôle de la largeur du lobe principal, c'est-à-dire, que le lobe principal peut être orienté vers n'importe quelle direction en changeant la phase du courant d'excitation de chaque élément du réseau (antennes à réseaux déphasés). En outre, en agissant également sur les paramètres du réseau, une grande variété de diagrammes de rayonnement avec une largeur du lobe principal et des caractéristiques de niveau des lobes secondaires peuvent être produites.

Il y a cinq paramètres principaux qui affectent les performances globales d'un réseau d'antennes :

- la géométrie du réseau (par exemple, linéaire, circulaire, ou planaire des éléments rayonnants).
- distances de séparation entre les éléments adjacents,
- amplitudes des courants d'excitation de chaque élément.
- phase de chaque élément rayonnant.
- diagramme de rayonnement de chaque élément.

La figure II.1 montre un exemple d'un réseau bidimensionnel (réseau plan) formé d'antennes de type « patch ».

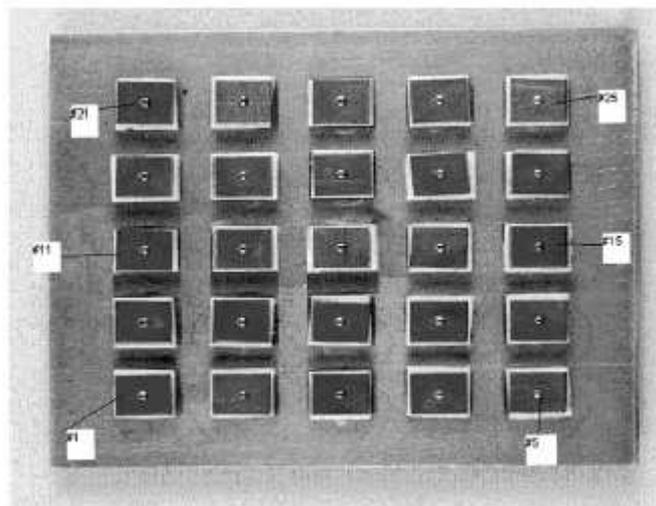


Fig. II.1 : Réseau plan 5x5 à éléments « patch »

II.2.1 Polarisation du réseau :

On appellera polarisation du réseau la polarisation du champ électrique total émis par l'ensemble des sources.

Dans le cas général, cette polarisation sera différente de celle que l'on obtiendrait en considérant le champ électrique émis par une seule source.

La polarisation du réseau sera donc, dans le cas général, elliptique [5]. Cependant, on peut recenser quelques cas particuliers:

1. si toutes les sources sont identiques et disposées sur un réseau linéaire "aligné", la polarisation du réseau est la même que celle de la source isolée ("toutes les sources parlent la même langue.")

2. polarisation du réseau rectiligne : si la composante en \vec{u}_θ du champ électrique total est proportionnelle à la composante en \vec{u}_ϕ ou si une des composantes est prépondérante devant l'autre.

3. polarisation du réseau circulaire : si la composante en \vec{u}_θ du champ électrique total est égale à la composante en \vec{u}_ϕ à un coefficient $\exp(\pm \pi.j / 2)$ près.

En dehors de ces cas particuliers, valables quelquefois seulement dans des régions particulières (un plan $\phi = \text{constante}$ par exemple), on ne peut pas déduire la polarisation du réseau de la polarisation des sources.

II.2.2 Effets du couplage :

Le diagramme d'une source élémentaire en présence de voisines très proches peut différer de beaucoup du diagramme d'une source seule. Si l'on raisonne à l'émission, l'excitation d'une source entraîne par « couplage » une certaine excitation des voisines qui recueillent une partie de l'énergie émise et qui en rerayonnent une autre partie entraînant une modification du diagramme et une réflexion vers l'entrée du réseau.

Dans des cas extrêmes, pour des sources très couplées, on peut obtenir, pour certaines directions un gain nul (blind effect).

II.2.3 Effets du déphasage :

Les antennes à balayage électroniques utilisent généralement des déphaseurs quantifiés, c'est-à-dire des déphaseurs qui ne peuvent prendre qu'un nombre limité d'états de phases. En conséquence une loi de phase linéaire nécessaire pour faire pointer le faisceau dans une direction donnée, est seulement approchée par les déphaseurs et donc, un certain nombre de défauts apparaîtront sur le diagramme.

Les effets de la quantification sur le diagramme sont :

- une perte de gain ;
- l'apparition d'un diffus ;
- éventuellement, l'apparition, pour certaines directions de pointages, d'un lobe parasite élevé appelé « lobe de quantification » et dû à des erreurs de phase périodiques ;
- une déviation de l'axe du faisceau qui peut être gênante dans les antennes de poursuite.

II.2.4 Facteur de réseau :

Supposons d'abord le scénario simple d'un alignement de deux dipôles élémentaires horizontaux d'antenne isolés dans l'espace, placé comme représenté sur la figure II.2. Le dipôle 1 est excité par un courant $I_1 \angle \phi / 2$, le dipôle 2 par le courant $I_2 \angle \phi / 2$. ϕ et d représentent respectivement le déphasage entre les courants et la distance entre les deux sources.

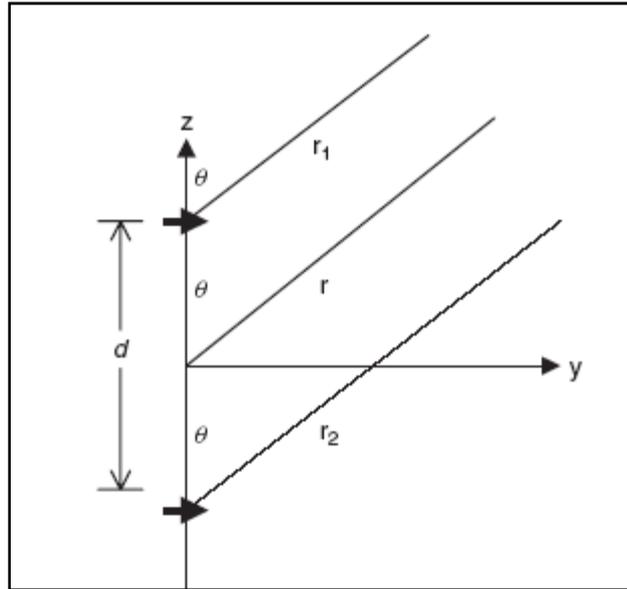


Fig. II.2 : Champ lointain de deux dipôles

Le champ électrique **[1]** au point M d'observation supposé très éloigné, est l'addition vectorielle des champs dus aux deux antennes (en négligeant les effets de couplage mutuels) :

$$\vec{E}_{\text{total}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{a}_\theta \left[\frac{j\eta b I_0}{4\pi r} e^{-jkr} \cos \theta \right] 2 \cos \left(\frac{1}{2} (bd \cos \theta + \phi) \right) \quad (1)$$

Tel que :

η : le gain du dipôle.

b : nombre d'ondes.

I_0 : l'amplitude du courant d'excitation.

r : la distance entre l'antenne et le point d'observation.

θ : l'angle d'orientation du diagramme.

ϕ : le déphasage des courants d'excitation

→

\vec{a}_θ : vecteur unitaire.

On observe que le champ total est égal au champ de l'élément simple situé à l'origine, multiplié par un facteur de réseau $F(\theta)$ donné par :

$$F(\theta) = 2 \cos \left(\frac{1}{2} (bd \cos \theta + \phi) \right) \quad (2)$$

D'une façon générale, le diagramme de champ lointain d'un réseau est donné par le diagramme de rayonnement de l'élément simple multiplié par le facteur de réseau :

Diagramme du réseau = Diagramme de l'élément simple × facteur de réseau

Le facteur de réseau est une fonction des paramètres suivants :

- l'arrangement géométrique des éléments rayonnants du réseau
- les courants d'excitation des éléments
- le nombre d'éléments
- la distance de la séparation d des éléments adjacents
- fréquences (ou longueur d'onde) d'opération

Les réseaux d'antennes sont généralement classés en trois types :

- Réseaux uniformes
- Réseaux non uniformes
- Réseaux quelconques.

Pour présenter le problème d'optimisation, nous supposons le cas simple d'un réseau linéaire uniforme à N éléments dont la formule [5] du facteur de réseau s'écrit :

$$F = 1 + e^{-j\theta} + e^{-j2\theta} + e^{-j3\theta} + \dots + e^{-j(N-1)\theta} \quad (3)$$

Dans le cas d'un réseau non uniforme, la formule précédente s'écrit :

$$F = A_0 + A_1 e^{-j\theta\phi} + A_2 e^{-j2\theta\phi} + A_3 e^{-j3\theta\phi} + \dots + A_{N-1} e^{-j(N-1)\theta\phi} \quad (4)$$

Dans le cas général (un réseau quelconque : non uniforme et non équidistant), cette même équation devient :

$$F = A_0 + A_1 e^{-j\theta\phi} + A_2 e^{-j2\theta\phi} + A_3 e^{-j3\theta\phi} + \dots + A_{N-1} e^{-j(N-1)\theta\phi} \quad (5)$$

En analysant cette formule, on remarque que trois types de paramètres peuvent être utilisés pour la synthèse : nombre d'élément N , l'amplitude des pondérations A et la distance inter-sources d .

II.2.5 Réseaux linéaires uniformes :

Considérons maintenant un réseau de N éléments de sources isotropes représentés sur la figure II.3. C'est un réseau linéaire puisque tous les éléments sont placés suivant une

ligne, et uniforme parce que les éléments identiques sont alimentés avec un courant de même amplitude mais avec un déphasage progressif ϕ . La distance de séparation entre les éléments adjacents est d . Dans ce cas-ci le facteur de réseau peut être exprimé comme la somme des contributions de chaque élément :

$$F(\psi) = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} \quad (6)$$

Où $\psi = (bd \cos \theta + \phi)$

C'est une série géométrique qui peut s'écrire de façon compacte par :

$$F = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (7)$$

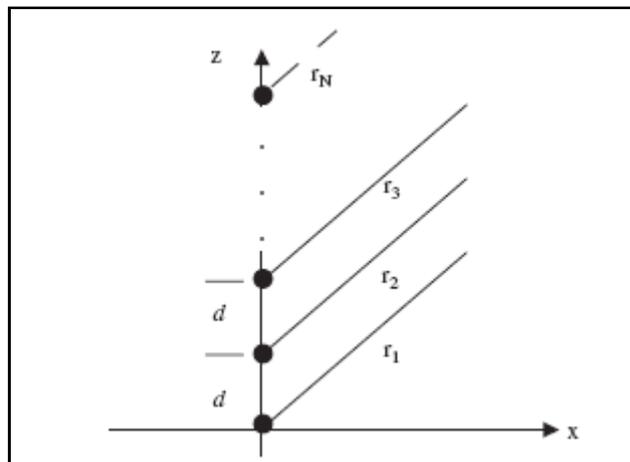


Fig. II.3 : Configuration d'un réseau uniforme de N sources isotropes

L'examen de cette équation permet de faire ressortir les points suivants concernant le facteur de réseau d'un réseau linéaire uniforme :

- ✓ Le maximum principal (lobe principal) se produit quand $\psi = 0$, c'est-à-dire,

$$bd \cos \theta_{\text{Max}} + \phi = 0 \quad \text{ou} \quad \theta_{\text{Max}} = \text{Arccos} \left(-\frac{\lambda \phi}{2\pi d} \right)$$

- ✓ Les nuls se produisent quand $\sin(N\psi/2) = 0$, c'est-à-dire, $N\psi/2 = \pm n\pi$ pour $n = 1, 2, 3, \dots$

a/ Effet du nombre d'antenne : Il est bon de rappeler qu'il n'existe pas de formules directes [5] permettant de trouver le nombre minimal de sources nécessaires à la formation d'un diagramme de rayonnement donné.

Le nombre N est donc un paramètre rarement optimisé (minimisé) et pourtant fondamental en raisons de coût, ou pour des raisons technologiques où c'est plus pratique d'utiliser le moins de sources possibles.

Généralement on prend plusieurs réseaux avec un nombre d'éléments N différents afin d'en trouver celui qui s'approche au mieux des contraintes de rayonnement fixées ou du gabarit imposé auparavant.

Pour tirer l'importance de faire varier ce paramètre, prenons par exemple, les cas d'un réseau linéaire et uniforme de 8, 13 et 20 sources pondérées toutes par 1, et traçons leur diagramme de rayonnement :

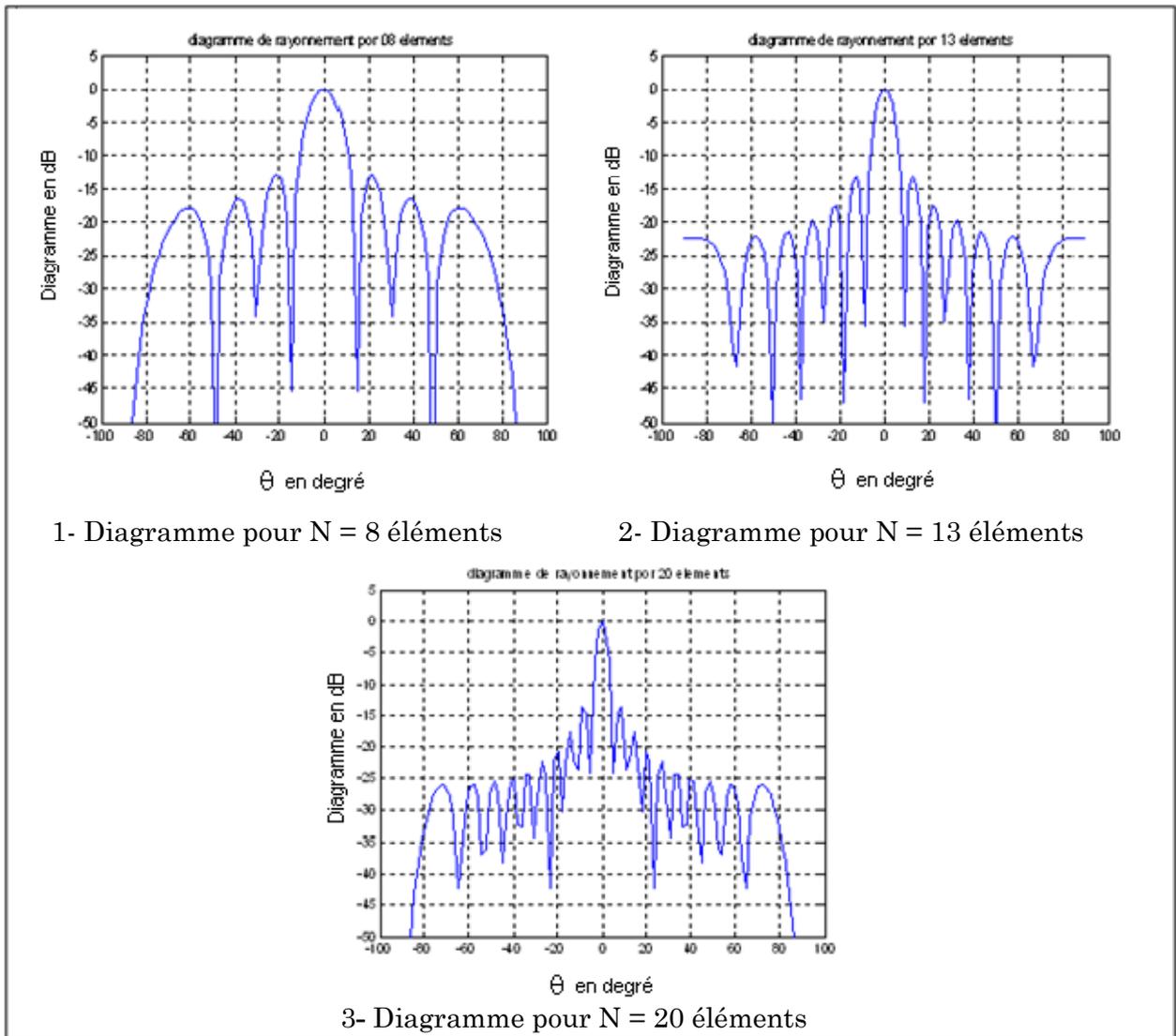


Fig. II.4 : Effet du nombre d'éléments sur le diagramme de rayonnement.

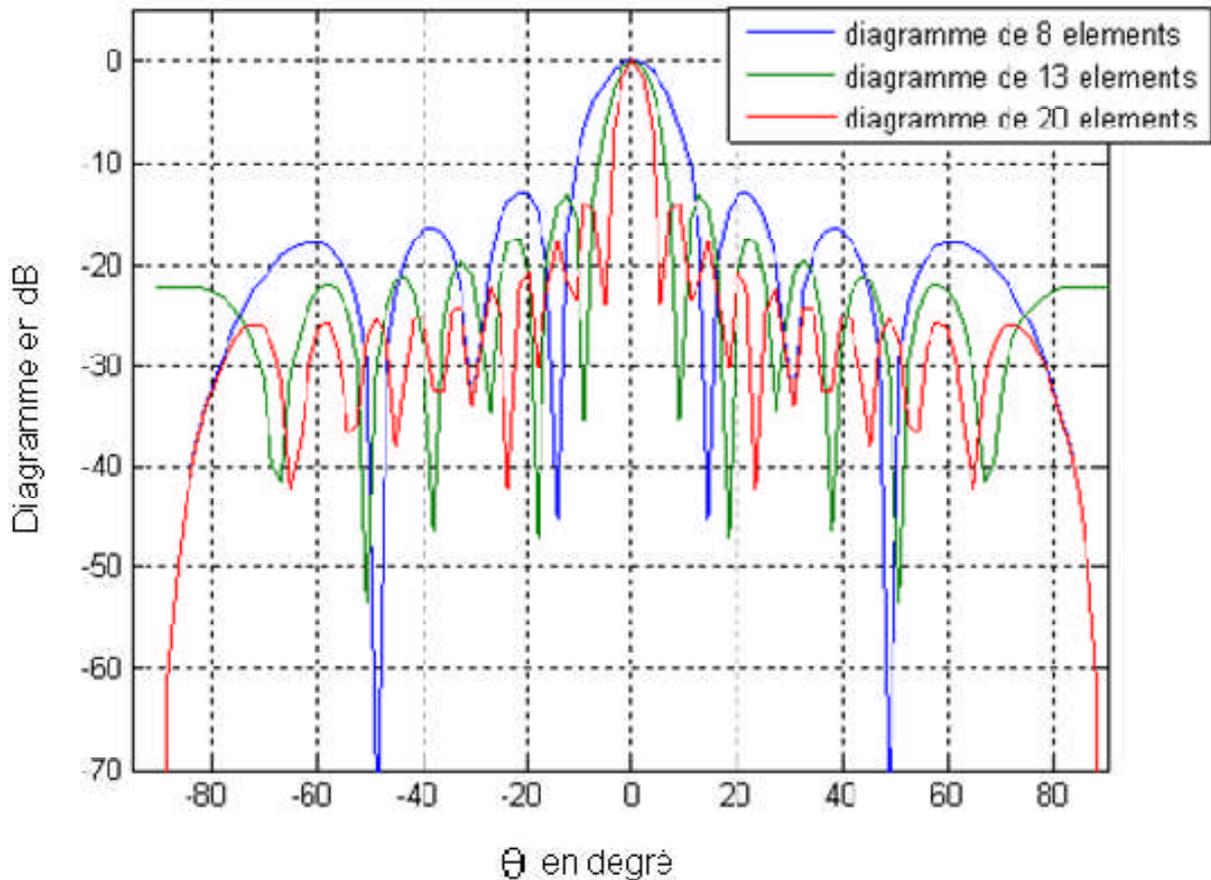


Fig. II.5 : Comparaison entre les trois diagrammes.

D'après la figure (II.5), L'augmentation de N augmente la directivité (l'ouverture du lobe principal) et le nombre de lobes secondaires, donc le réseau d'antennes est plus directif s'il contient plus d'éléments, mais cela augmente en revanche le nombre de lobes secondaires, ce qui nous oblige à chercher un compromis ou à manipuler d'autre paramètre (d).

b/ Effet de la position des sources : Les éléments d'un réseau d'antennes doivent être parfaitement implémentés les uns par rapport aux autres tout dépend de leur application, et en respectant certaines conditions. En général, on ne doit pas avoir un dédoublement du lobe principal dans la zone balayée. Le nombre de lobes principaux dans l'espace réel dépend de la distance d entre les sources :

- Si $d \leq \lambda/2$, il y a un seul lobe principal.
- Si $d \geq \lambda$, il y a plus d'un lobe principal. Les lobes en plus s'appellent lobes de réseau.
- Lorsque $\lambda/2 \leq d \leq \lambda$, l'apparition de lobes de réseau dépend du déphasage φ . Pour

$$\text{l'éviter, on doit avoir : } d < \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_{\text{Max}}|} \quad (8)$$

Nous allons tracer le diagramme de rayonnement d'un réseau linéaire uniforme de 8 sources pondérées toutes par 1. Dans cet exemple, on fait varier seulement l'écartement entre les sources, avec successivement $d = 0.4\lambda$, 0.5λ , 0.7λ . On obtient les diagrammes suivants :

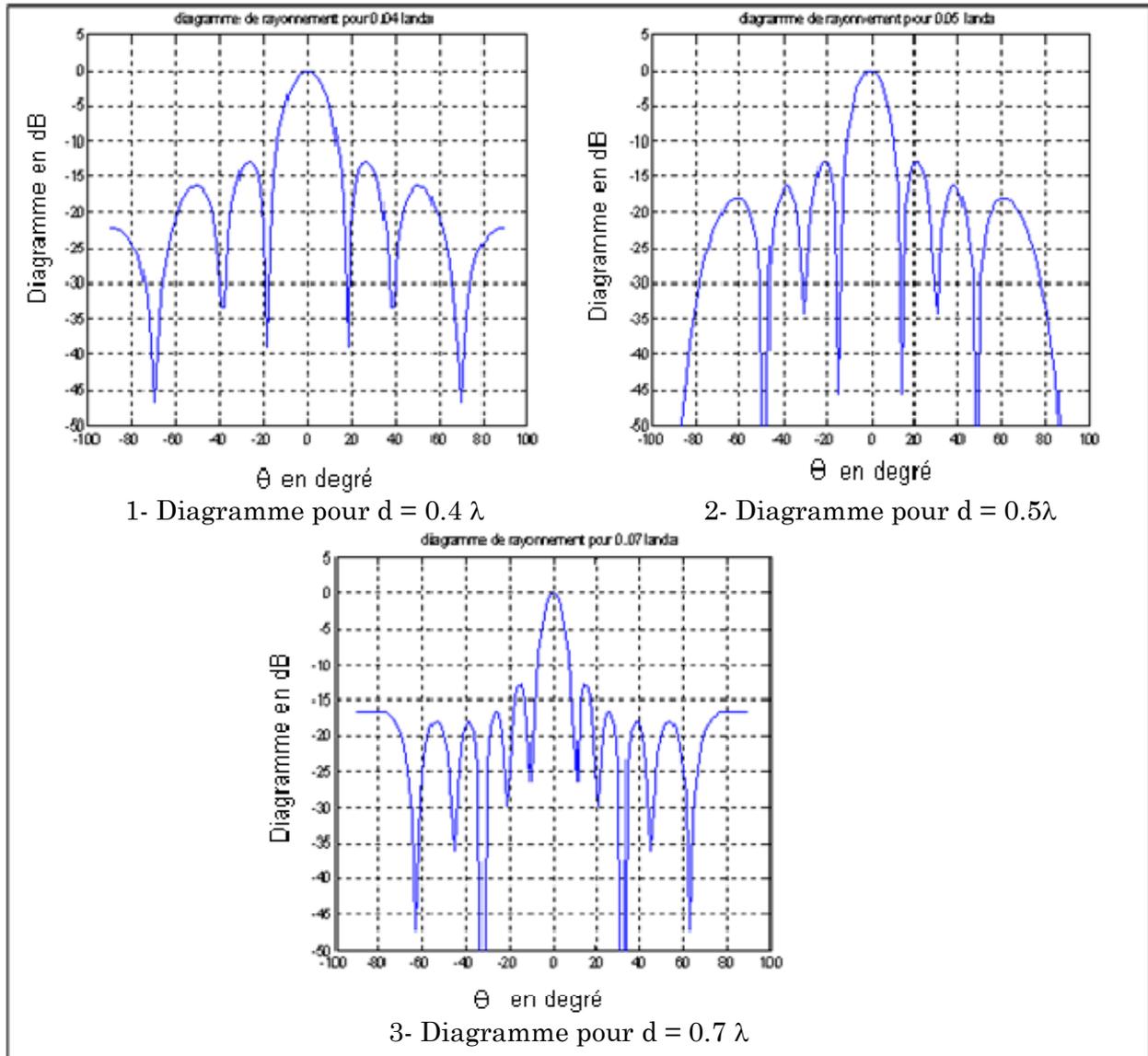


Fig. II.6 : Effet de la distance sur le diagramme de rayonnement.

D'après les diagrammes obtenus, nous constatons que la largeur du lobe principal ainsi que celle des lobes secondaires est inversement proportionnelle à la distance entre les éléments de réseau, on peut donc noter :

Plus la distance inter-sources est grande plus le réseau est directif et le nombre de lobes secondaires est important, ce qui donne une relation avec les résultats de la première expérience (lors de la variation du nombre de sources) , donc, on a pu obtenir des diagrammes semblables à ceux de la première expérience en jouant sur d , c à d, avec 8 éléments distants de 0.7λ (tracé 3, fig. II.6) on a eu presque le même diagramme que celui

obtenu avec 13 éléments (tracé 2, fig. II.4) de la première expérience, et la figure (II.7) illustre la correspondance des deux diagrammes. Ce qui présente un gain en coût et moins de complexité et d'encombrement.

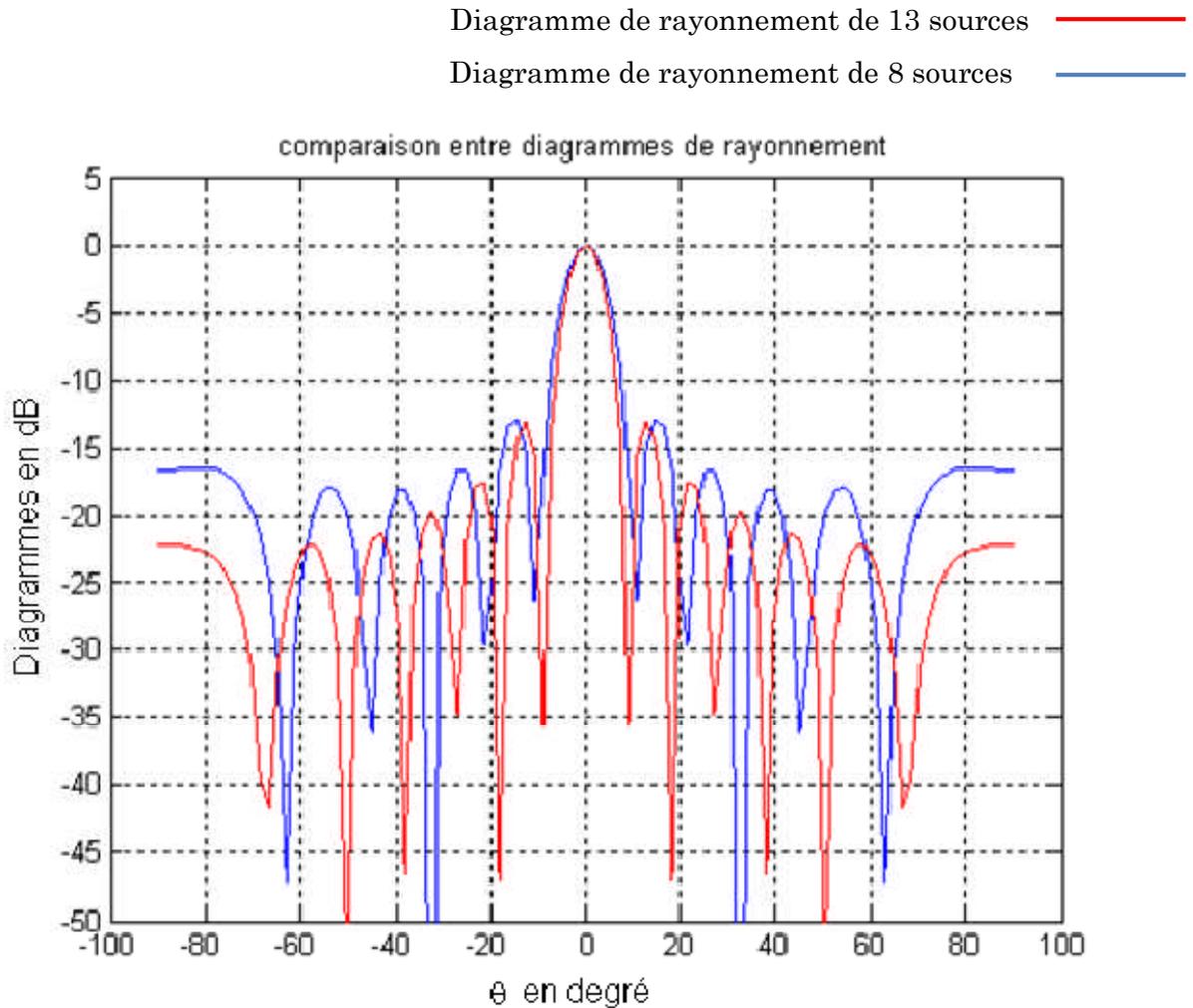


Fig. II.7 : Exemple de l'effet des paramètres de synthèse (N , d) sur le diagramme de rayonnement.

Nous pourrions donc se servir de ce paramètre (d) comme variable à optimiser en vue d'obtenir certaines propriétés du diagramme de rayonnement, mais, il est bon de préciser que la distance entre le lobe principal et les lobes secondaires est restée la même dans toutes les expériences réalisées jusqu'ici. Donc, contrôler cette distance est loin d'être réalisable en jouant sur le nombre d'éléments ou sur les distances entre les sources, pour cela, un troisième paramètre intervient ; il s'agit des pondérations de courant des sources.

II.2.6 Réseaux non uniformes :

Les alignements non-uniformes sont des alignements dont les éléments peuvent avoir des excitations variables. On utilise des réseaux non-uniformes afin par exemple de réduire le niveau des lobes secondaires du diagramme ou d'imposer des nuls dans certaines

directions. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour obtenir les excitations des éléments du réseau.

Par exemple, on peut employer la méthode de placement des zéros de Schelkunoff pour placer des nuls dans certaines directions dans le diagramme de rayonnement. Une autre technique bien connue est l'approche binomiale, qu'on peut employer pour réaliser des niveaux de lobes secondaires nuls quand l'espacement entre les antennes de l'alignement est de $\lambda/2$. Cependant, ceci provoquera également une plus grande largeur de faisceau. Une technique offrant un compromis entre les réseaux uniforme et binomial est le réseau de Dolph-Chebyshev.

a/ Synthèse par la méthode binomiale :

Dans le cas d'un réseau binomial avec N éléments, on peut montrer que le facteur de réseau avec des coefficients d'excitation non-uniformes peut s'exprimer comme :

$$F(\theta, \varphi) = (1 + e^{j\psi})^{N-1} = 1 + (N-1)e^{j\psi} + \frac{(N-1)(N-2)}{2!}e^{j2\psi} + \dots \quad (9)$$

On observe que les courants du réseau prennent la forme d'une série binomiale et c'est pourquoi ce réseau est connu sous le nom de réseau binomial. Le tableau suivant montre les coefficients d'excitation pour différentes valeurs de N.

1										$N = 1$
1	1									$N = 2$
1	2	1								$N = 3$
1	3	3	1							$N = 4$
1	4	6	4	1						$N = 5$
1	5	10	10	5	1					$N = 6$
1	6	15	20	15	6	1				$N = 7$
1	7	21	35	35	21	7	1			$N = 8$
1	8	28	56	70	56	28	8	1		$N = 9$
1	9	36	84	126	126	84	36	9	1	$N = 10$

Coefficients binomiaux

• **Avantages :**

Le réseau binomial possède des lobes secondaires très bas qu'on peut annuler lorsque la distance est de $\lambda/2$.

• **Inconvénients :**

- Ils ont une ouverture grande comparativement au réseau uniforme
- Il y a de grandes variations entre les coefficients d'excitation.

b/ Synthèse par la méthode de Dolph-Tchebychev :

Dans le cas où on applique des jeux de pondérations différents, on peut aboutir à des diagrammes de rayonnement de formes tout a fait différentes, de même, en jouant sur les pondérations, on peut contrôler le niveau entre le lobe principal et les lobes secondaire, Pour le démontrer, on applique la méthode d'optimisation de Dolph-Tchebychev qui est basée sur les propriétés des polynômes de Tchebychev, et qui permet d'obtenir le maximum de gain pour un niveau de lobes secondaires imposé. Cette méthode utilise le fait que la répartition optimale des amplitudes des sources est celle qui donne, pour expression du champ rayonné par un alignement de N sources, les polynômes de Tchebychev de degré (N-1). Ce polynôme présente toujours un maximum de niveau important qui correspond au maximum du lobe principal du diagramme de rayonnement, et une succession de maxima et de minima d'amplitudes égales, qui correspondent ici aux lobes secondaires. Ainsi par la suite on va présenter la synthèse de diagramme de rayonnement en utilisant le polynôme de Tchebychev de degrés 8,13 et 20, qui correspondra respectivement, dans la méthode de Dolph au rayonnement d'un alignement de 8,13 et 20 sources [4].

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

En pratique, le calcul de l'amplitude de la distribution avec cette méthode se fait de la façon suivante :

- Faire un changement d'échelle de façon à traduire la condition d'optimisation introduite en fixant R tel que :

$$= \frac{T_{n-1}(x_0)}{R} \qquad T_{n-1}(x_0) = R \qquad (10)$$

- Le calcul de x_0 par des procédés graphiques ou en utilisant les propriétés des polynômes conduit à l'expression :

$$x_0 = \frac{1}{2} \left[(R + \sqrt{R^2 - 1})^{\frac{1}{n-1}} + (R - \sqrt{R^2 - 1})^{\frac{1}{n-1}} \right] \qquad (11)$$

En remplaçant x_0 dans la formule suivante :

$$E_n\left(\frac{x}{x_0}\right) = f \left[\sum A_i T_i\left(\frac{x}{x_0}\right) \right] = T_{n-1}(x) \qquad (12)$$

On peut identifier les A_i de la fonction f avec les coefficients du polynôme $T_{n-1}(x)$. Les A_i représenteront alors les amplitudes des courants alimentant les N sources.

- Après l'obtention du vecteur des pondérations A_i , on trace le diagramme de rayonnement du réseau de N élément, en appliquant la formule suivante :
- **Si N est pair**

$$F = \sum_{i=0}^{N/2-1} 2 \cos^2 \left((2i+1) \frac{\pi}{2} \right) \quad (13)$$

Avec :

F : le facteur de réseau

$S = dx \cdot k \cdot \sin \theta$

dx : la distance entre les éléments.

b : nombre d'ondes.

- **Si N est impair :**

$$E = \sum_{i=0}^{(N-1)/2} 2 \cos \left((2i+1) \frac{\pi}{2} \right) \quad (14)$$

Dans ce qui suit, nous allons donner les résultats de 3 exemples avec $d = 0.5 \lambda$ (pour éviter l'effet de couplage) et $R = 20$ db.

L'exemple 1 : 8 sources

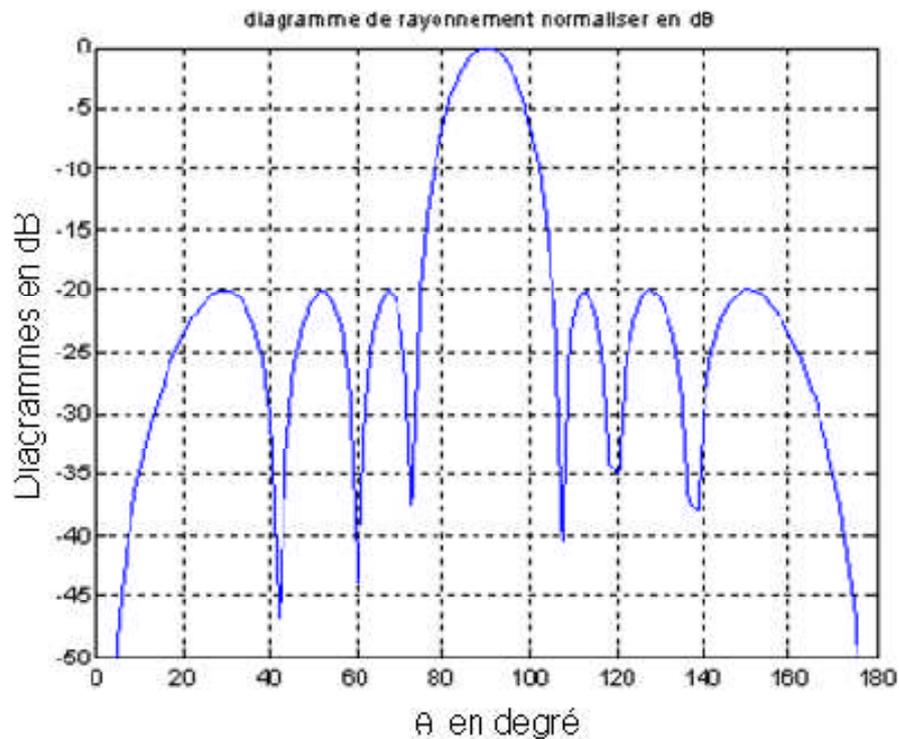


Fig. II.8 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 8 éléments

L'exemple 2 : 13 sources

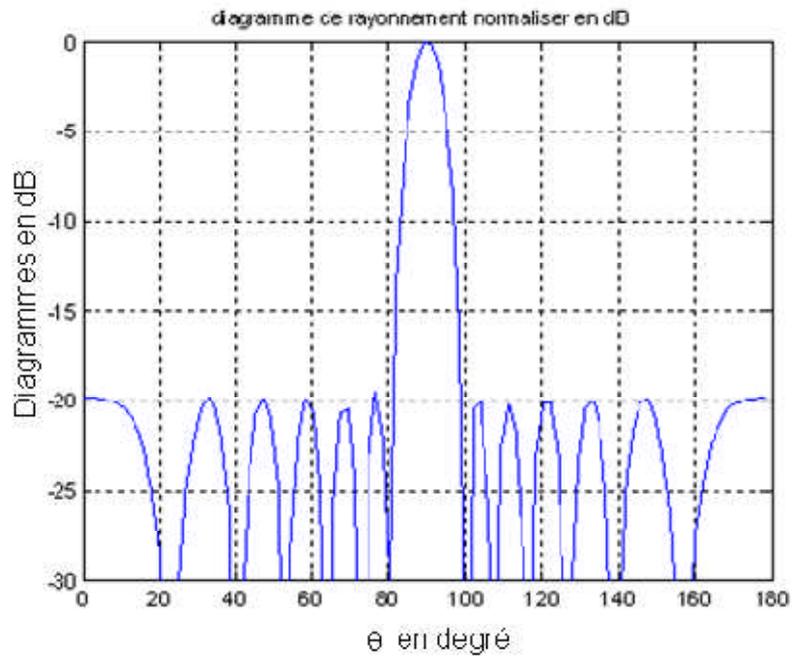


Fig. II.9 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 13 éléments

L'exemple3 : 20 sources

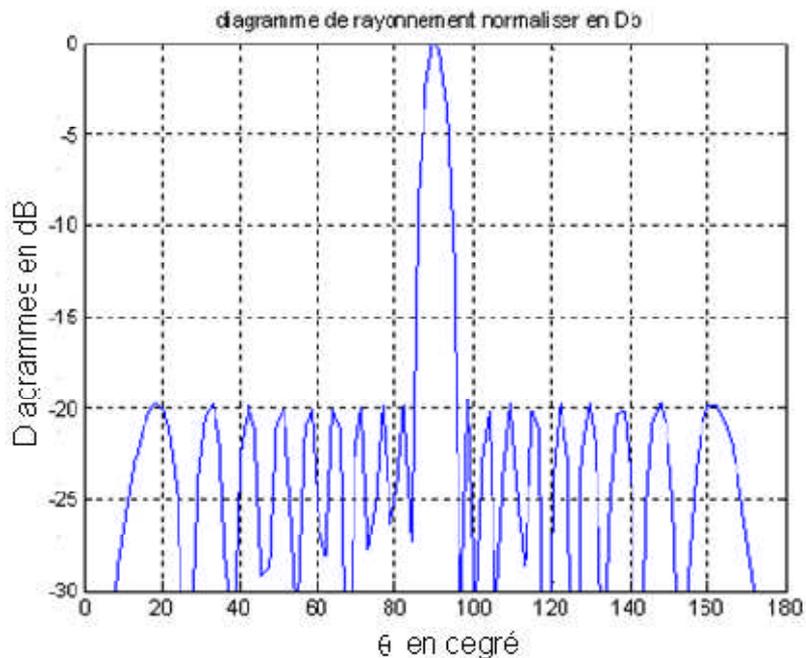


Fig. II.10 : diagramme de rayonnement d'un réseau de 20 éléments

Constatation :

En observant les trois figures obtenues par la méthode de Tchebychev, on remarque que cette méthode offre l'avantage d'obtenir le maximum de gain pour un niveau de lobes secondaires imposé (ou encore, le rapport entre le niveau du lobe principal et celui des lobes

secondaires), quelque soit le nombre d'antennes utilisées, et ça, en nous donnant les amplitudes des courants adéquates (basée sur les propriétés des polynômes de Tchebychev). Mais de l'autre côté, on voit que la largeur du lobe principal et le nombre des lobes secondaires varient avec la variation du nombre de sources, ce qui pose un problème lorsqu'on désire avoir une conception d'un diagramme de rayonnement avec une directivité, un nombre et un niveau de lobe secondaire bien précis, ce qui fait que cette méthode ne peut être utilisée dans des cas assez exigeants.

Et c'est pour cela qu'on fait appel à d'autres méthodes plus performantes et qu'on appelle les algorithmes d'optimisation, visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

Ces algorithmes sont généralement stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution (d'une manière proche des algorithmes d'approximation).

Il existe un grand nombre d'algorithmes d'optimisation différents, 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.

Pour un réseau d'antennes linéaire, l'optimisation consiste donc à trouver le vecteur des pondérations et celui des distances séparant les sources en satisfaisant un certain nombre de conditions (généralement la fonction du diagramme de rayonnement doit satisfaire un gabarit). Mais trouver les deux vecteurs à la fois, présente un problème majeur pour l'optimisation, car il est pratiquement irréalisable par une méthode directe, Compte tenu de la diversité des buts recherchés par les utilisateurs, on ne trouvera pas une méthode générale de synthèse applicable à tous les cas, mais plutôt un nombre important de méthodes propres à chaque type de problème. Cette diversité de solutions peut être exploitée pour constituer une base de données utile pour une approche générale de synthèse d'un réseau d'antennes linéaires.

II.3 Quelques méthodes d'optimisation des réseaux d'antenne :

II.3.1 processus d'optimisation :

La figure (II.11) présente les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation.

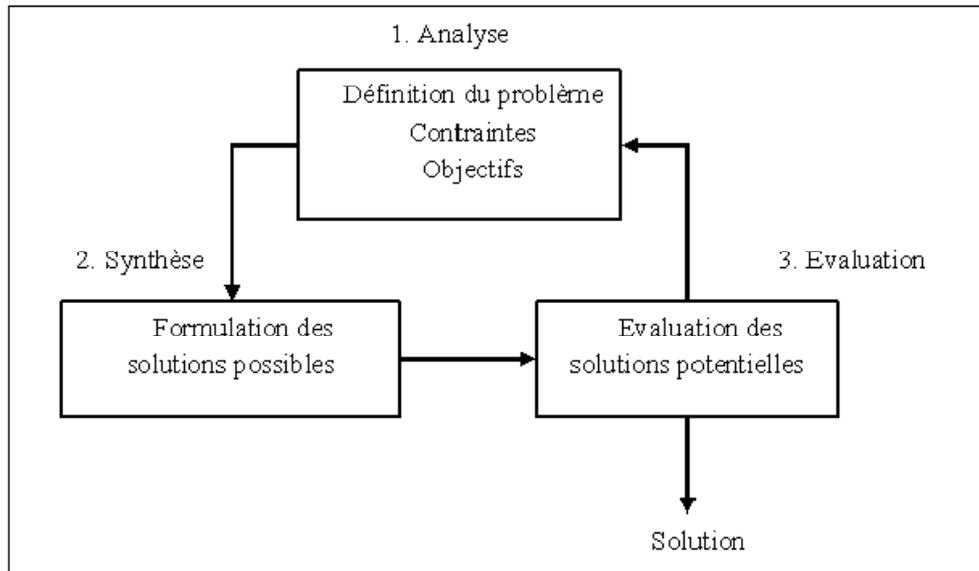


Fig. II.11 : Processus d'optimisation

Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer certains choix préalables :

- Variables du problème : quels sont les paramètres intéressants à faire varier ?
- Espace de recherche : dans quelles limites faire varier ces paramètres ?
- Fonction objectif : quels sont les objectifs à atteindre ?
- Méthode d'optimisation : quelle méthode choisir ?

Une fois effectués ces choix, la méthode choisie synthétise les solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable.

1. Les variables de la fonction objectif sur lesquelles porte l'optimisation, sont les variables de conception qui peuvent être de natures diverses. Par exemple, pour un réseau d'antennes, il peut s'agir de la position des antennes, de leurs courants d'alimentation, etc.

C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres afin d'augmenter les degrés de liberté de l'algorithme.

2. Dans certains algorithmes d'optimisation, tels que les stratégies d'évolution, l'espace de recherche est fini.

3. La fonction objectif ou d'évaluation f (fitness) : permet de mesurer l'efficacité de la solution. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. En effet, quelle que soit sa définition, l'algorithme convergera vers un

optimum de cette fonction. Elle doit donc exprimer le plus fidèlement possible sous forme mathématique le ou les objectifs à atteindre.

Dans les problèmes de conception de réseaux d'antennes, la fonction « fitness » peut être par exemple le niveau des lobes secondaires. Le problème d'optimisation consistera donc à minimiser ce niveau.

4. Une fois définie la fonction à optimiser, il s'agit de choisir une méthode adaptée au problème posé. Les méthodes peuvent être classées en méthodes déterministes et en méthodes non-déterministes. Les méthodes déterministes (par exemple la méthode de gradient) sont en général efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide ou quand la forme de la fonction est connue a priori. Les cas complexes seront souvent traités plus efficacement par des méthodes non-déterministes.

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques méthodes souvent rencontrées dans l'optimisation des réseaux d'antennes linéaires (neurone, recuit simulé, génétique.).

II.3.2 Principe général des réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles mathématiques inspirés de la structure et du comportement des neurones biologiques [8]. Ils sont composés d'unités interconnectés que l'on appelle neurones formels ou artificiels capables de réaliser certaines fonctions particulières et bien précises.

Les RNA permettent d'approcher des relations non linéaires à des degrés de complexité importants. Généralement on utilise dans ce type de réseaux une fonction d'activation sigmoïde.

L'apprentissage dans ce type de réseau, consiste en un entraînement. On présente au réseau des entrées et on lui demande de modifier sa pondération de telle sorte que l'on retrouve la sortie correspondante.

L'algorithme consiste dans un premier temps à propager vers l'avant les entrées jusqu'à obtenir une sortie calculée par le réseau. La seconde étape compare la sortie calculée à la sortie réelle connue. On modifie alors les poids synaptiques de sorte qu'à la prochaine itération, l'erreur commise entre la sortie calculée et connue soit minimisée. On rétro-propage alors l'erreur commise vers l'arrière jusqu'à la couche d'entrée tout en modifiant la pondération.

II.3.3 Principe général du recuit simulé :

Le recuit simulé est apparu en 1982, avec la publication dans la revue science d'un article de Kirpatrick (Kirpatrick.S &al 83). Le recuit simulé fut obtenu par analogie avec le phénomène thermodynamique de recuit des métaux en métallurgie, et qui vise à atteindre une configuration d'énergie minimale. Initialement, le métal est porté à très haute température, puis il est refroidi progressivement [7]. La méthode du recuit simulé (RS) a l'originalité de pouvoir s'appliquer à une grande variété de domaines et en particulier aux télécommunications.

Le recuit simulé est une heuristique d'optimisation qui consiste en une recherche locale par perturbations [4]. Ce processus donne la possibilité de s'éloigner occasionnellement d'un minimum local pour permettre ainsi un élargissement du champ de recherche de la solution idéale. Dans cette méthode, la topologie courante est retenue momentanément comme meilleure solution, est continuellement comparée à d'autres topologies qui lui sont très proches. Ces topologies voisines sont obtenues à la suite de petites perturbations sur la topologie courante. Lorsqu'une perturbation aboutit à une topologie meilleure que la solution courante, elle est sauvegardée comme solution courante. Cependant, il peut arriver que, suite à une perturbation, la topologie voisine obtenue soit conservée comme solution courante, même si elle n'est pas meilleure que la solution courante, à condition qu'elle respecte une certaine probabilité d'acceptation. Le fait d'accepter de temps à autre une solution dégradée permet d'éviter de s'enfermer trop tôt dans un minimum local.

II.3.4 Principe général de l'Algorithme Génétique :

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées [4] de la génétique et de l'évolution naturelle : croisement, mutation, sélection.

Il a déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. L'algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants : un principe de codage de l'élément de population, un mécanisme de génération de la population initiale, une fonction à optimiser, des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et des paramètres de dimensionnement.

Les mécanismes de base usuels sur lesquels repose la méthode des algorithmes génétiques sont principalement la représentation des chromosomes et les opérateurs génétiques. Un bon choix des paramètres de ces chromosomes assure la convergence vers

une bonne solution. Dans un AG, les chromosomes ont souvent une représentation binaire. Ce choix le rend intuitivement applicable à tous les problèmes dont les solutions sont transposables en binaire.

De façon générale, un AG fonctionne [4] de la façon suivante:

Étape 1: On génère une population initiale de taille n chromosomes, puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome: c'est la première génération de chromosomes.

Étape 2 : On évalue chaque chromosome par la fonction objectif, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.

Étape 3 : Le cycle de génération des populations commence alors, chaque nouvelle population remplaçant la précédente. Le nombre x de générations est déterminé au départ. Dans chaque génération, on choisit n chromosomes auxquels on va appliquer les différents opérateurs génétiques. Après chaque génération, les n nouveaux chromosomes créés remplacent la génération précédente. Après la $x^{\text{ième}}$ génération, les chromosomes auront évolué de telle façon que cette dernière génération contienne des chromosomes meilleurs que ceux des générations précédentes.

II.4 Réseau d'antenne du Localiser :

Il est constitué d'un ensemble d'antennes situées dans l'axe de piste, environ 300 m après la piste (à l'opposé du seuil de piste), une antenne centrale émet un signal modulé à 1020 HZ correspondant à l'indicatif de l'ILS. Des antennes latérales émettent une porteuse VHF modulée en amplitude par deux signaux basses fréquences, à 90 Hz et à 150 Hz.

II.4.1 Etude du digramme de rayonnement :

Le localizer modernes est appelé «LOCALIZER DIRECTIF», ceci parce qu'il a un diagramme de rayonnement double comprenant un diagramme directif (antenne d'alignement) plus un diagramme de couverture (ou clearance);

Le diagramme directif, produit par les antennes d'alignement, définit l'axe d'alignement de piste (angle d'ouverture $\pm 10^\circ$ autour de l'axe).

Le digramme de couverture, produit par les antennes de couverture, est moins directif, en forme de deux haricots, il permet à l'avion de se situer par rapport à l'axe de piste (gauche / droite) en dehors du diagramme directif ($>\pm 10^\circ$), d'autre part une partie d'émission se fait du côté arrière (opposé à la piste), ce faisceau arrière (lorsqu'il existe) peut être utilisé pour une approche au QFU inverse (l'axe inverse) de celui de l'ILS (BACK

BEAM). Le diagramme permet aussi de masquer les lobes parasites du diagramme d'alignement (masquer les faux axes du diagramme directif).

Le diagramme du rayonnement d'un localiser directif est produit par le rayonnement simultané de 2 porteuses VHF modulées en amplitude et séparées de 9,5 KHZ, une porteuse est rayonnée par les antennes d'alignement, l'autre porteuse par les antennes de couverture.

- Antennes d'alignement : constituées de 12 antennes séparées par $\lambda/2$ avec un réflecteur fournissant un diagramme de rayonnement très directif dans un secteur 10° de part et d'autre de l'axe, c'est ce diagramme qui est utilisé pour l'alignement sur l'axe. Le diagramme obtenu a des lobes parasites qui vont être masqués par le diagramme de couverture.

- Antennes de couverture : constituées de 3 antennes séparées par $\lambda/2$ fournissant un diagramme de rayonnement moins directif ayant la forme de 2 haricots.

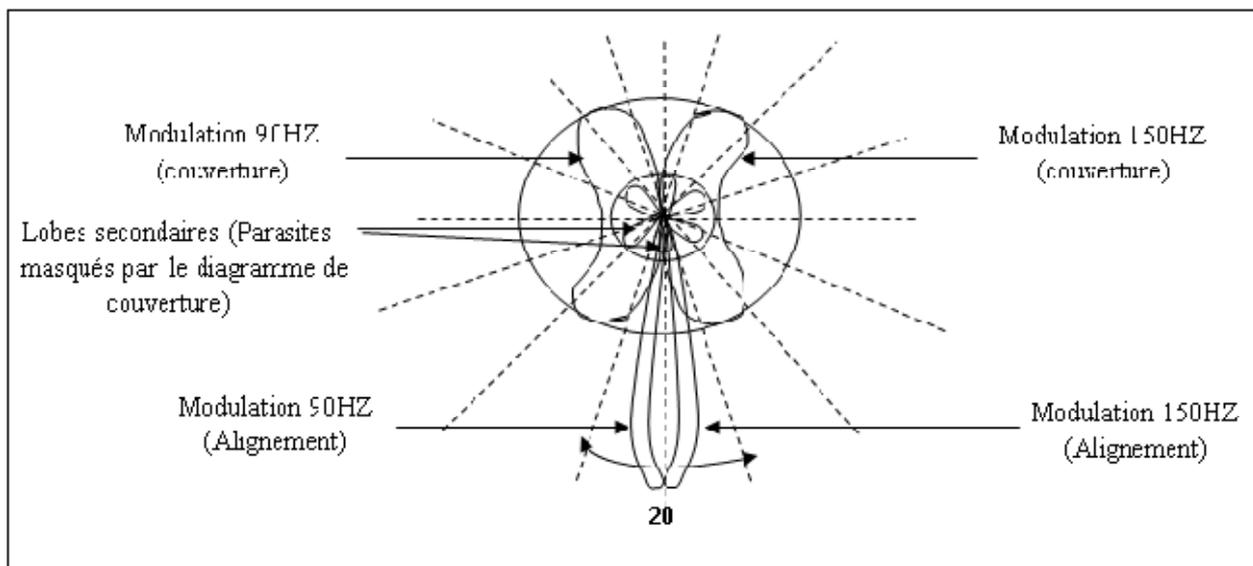


Fig. II.12 : L'allure du diagramme de rayonnement des antennes LOC.

La qualité des signaux de navigation interprétés par le récepteur de bord, notamment le faible signal de cap observé durant la descente de la ligne d'approche, est liée en grand partie à la topographie du terrain et à l'absence d'obstacles sur le sol. Les versions des équipements qui existent permettent de supprimer l'influence de ces conditions topographiques en offrant les versions suivantes :

- **Radiophare d'alignement de piste 1F** « mono fréquence » : Destiné aux terrains essentiellement plats, sans obstacle, cet environnement exige une antenne à faisceau de 12 éléments.

- **Radiophare d'alignement de piste 2F** « bi fréquence » : Ce système est propice aux terrains en présence de collines, de bâtiments ou autre obstacle situé en face ou en bordure de la piste d'atterrissage et qui pourraient faire office de réflecteurs, dans ce cas on utilise des antennes à ouverture moyenne (13 éléments) ou à large ouverture (21 éléments) à savoir le degré d'obstruction du champ d'atterrissage.

Les diagrammes de rayonnement des radiophares d'alignement de piste sont générés avec des types d'antenne spécifiques. Les réseaux d'antennes sont excités par des signaux CSB (Carrier Signal with Side Bands (HF), Signal de porteuse avec bande latérale) et SBO (Side bands Only, Bandes latérales seulement) de cap, les installations 2F sont également excités par des signaux CSB et SBO de clearance afin d'obtenir les performances DDM et de couverture spécifiées. Les réseaux destinés à l'installation 1F et à l'installation 2F correspondent à de larges réseaux linéaires de dipôles placés devant un écran de réflexion vertical. Les dipôles sont excités de manière à générer de larges diagrammes.

En présence d'une installation 2F, le réseau génère de larges diagrammes de clearance offrant une couverture de signaux d'azimut de $\pm 35^\circ$ maximum.

Le faisceau vertical est déterminé par la caractéristique des dipôles omnidirectionnels devant le réflecteur vertical et par la hauteur d'antenne au-dessus du sol réfléchissant. Le signal de bande latérale de porteuse (CSB—CS) dévolu à l'alignement englobe le signal de porteuse et le signal de modulation 150 Hz et 90 Hz, les deux en phase avec la porteuse. Le signal de bande latérale seulement (SBO—CS), dévolu à l'alignement, contient uniquement les deux signaux de modulation en opposition de phase (180°). Le signal de clearance de l'installation 2F contient le signal de porteuse, décalé de 8 kHz (± 4 kHz) par rapport à la fréquence de la porteuse du signal de cap. Le signal de clearance comprend un signal CSB (—CL) et un signal SBO (—CL). Toutefois, afin d'améliorer le taux de capture entre les signaux de cap et de clearance sur la ligne d'alignement, le système offre une intensité de champ minimum dans le signal CSB de clearance dans la direction de la ligne médiane, (voir Fig. II.13, II.14). [6]

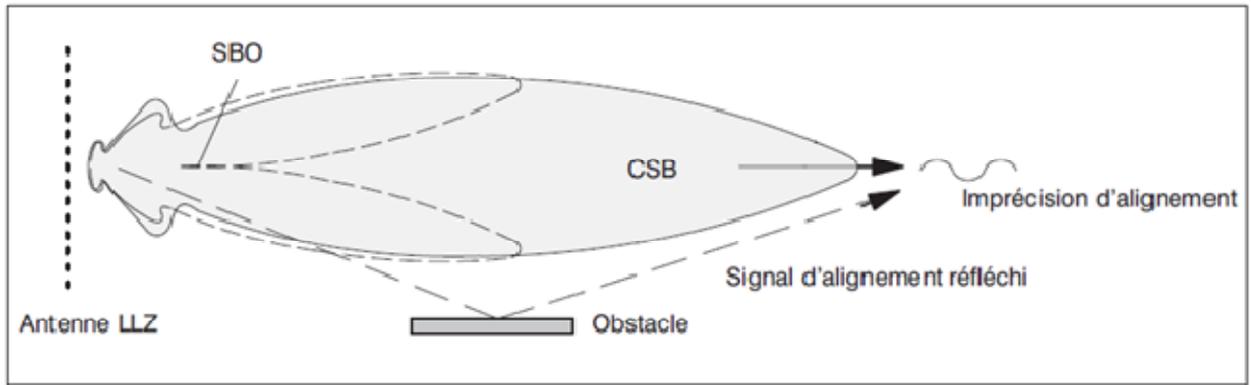


Fig. II.13 : Diagramme de rayonnement du LLZ 1F.

L'antenne à 12 éléments du radiophare d'alignement de piste 1F est conçue de manière à générer un diagramme de rayonnement suffisamment large pour offrir une intensité de champ adéquate, même pour les appareils qui s'approchent de côté avec un angle ouvert.

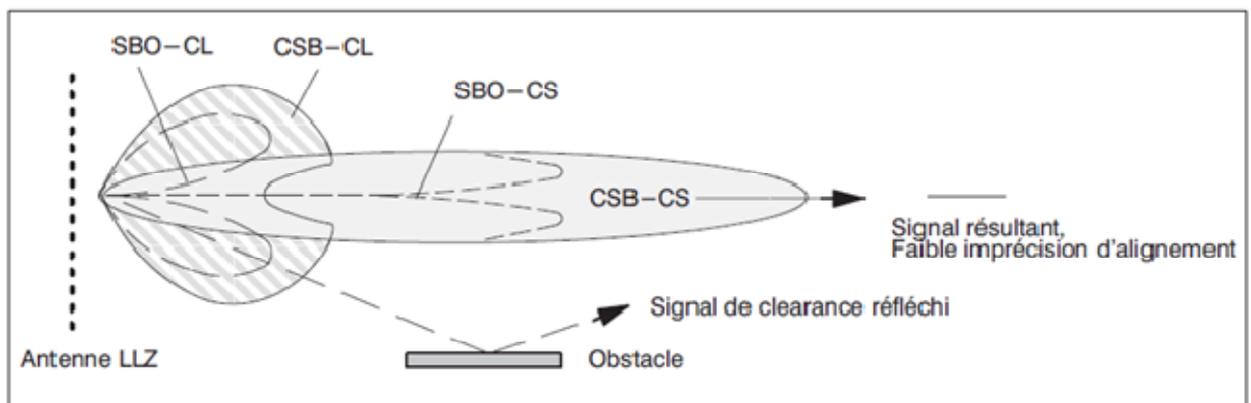


Fig. II.14 : Diagramme de rayonnement du LLZ 2F.

L'antenne de l'installation bi fréquence est disposée de sorte que le signal de cap soit émis par des diagrammes de faisceaux étroits, présentant un niveau de lobe latéral réduit. En raison de la réduction significative de l'intensité de champ à une certaine distance à gauche et à droite de la ligne d'alignement, les réflexions sont de même considérablement plus faibles.

Exemple des réseaux d'antenne LLZ 1F et LLZ 2F :

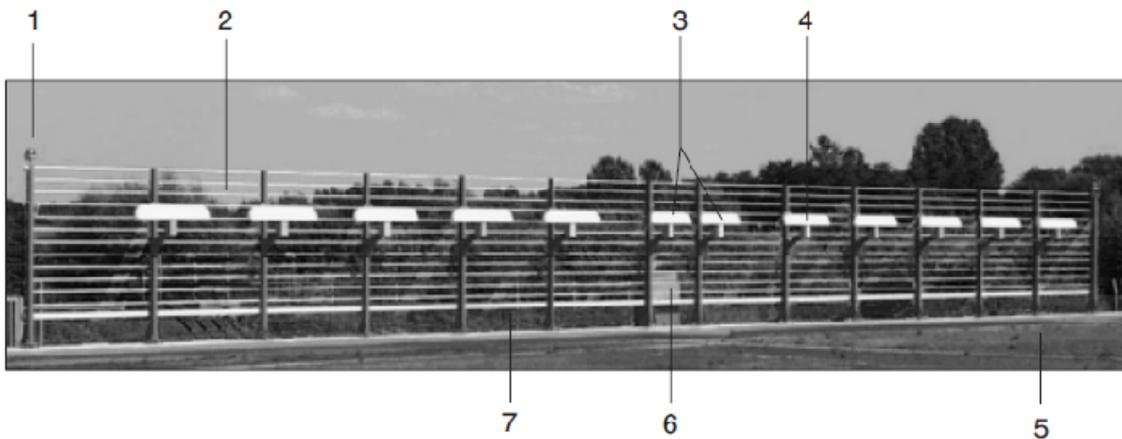


Fig. II.15 : Antenne LLZ 1F

- 1- Poteau (14), feu d'obstacle (2)
- 2- Barre de réflecteur (2 à 13)
- 3- Antennes dipôle centrales (2, longueur 1084 mm)
- 4- Antenne dipôle (10, longueur 1354mm)
- 5- Dipôle 1 (vu dans la direction du rayonnement)
- 6- Unité de distribution (abrite le répartiteur de puissance et le réseau intégral)
- 7- Conduit de câbles



Fig. II.16 : Antenne LLZ 2F (à large ouverture, 21 éléments)

- 1- Barre de réflecteur (12)
- 2- Poteau (23)
- 3- Dipôle (21)
- 4- Unité de distribution d'antenne, comprenant le répartiteur de puissance, le réseau intégral et réseau de combinaison
- 5- Dipôle 1 (vu dans la direction du rayonnement)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le contexte général de notre étude, à savoir la synthèse des diagrammes de rayonnement. Nous avons ainsi passé en revue les différents paramètres de synthèse et leur influence sur le diagramme de rayonnement, et nous avons présenté quelques méthodes de synthèse ainsi qu'un aperçu sur le réseau et les diagrammes de rayonnement du Localizer.

Chapitre III :

Optimisation par essaim de particules (OEP)

III.1 Introduction :

Le concept initial d'optimisation par essaim de particules (OEP) (ou particle swarm optimization (PSO) en anglais) s'inspire à l'origine du monde du vivant. Il s'appuie notamment sur un modèle développé par le biologiste Craig Reynolds à la fin des années 1980. Cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons.

En 1995, ce concept a été développé par, Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) [11], qui, au départ, cherchaient à simuler la capacité des oiseaux à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction tout en restant en une formation optimale[10] . Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage.

D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme (imitation) dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire.

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.

Le modèle proposé par Russel Eberhart et James Kennedy a ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation. Cet algorithme est donc motivé par une métaphore socio-psychologique, où l'optimiseur applique le régime d'échange d'informations entre les individus dans un essaim (un essaim d'abeilles, une volée d'oiseaux ou un banc de poissons) au cours de leurs activités de recherche de nourriture.



Fig. III. 1 : formation optimale d'un groupe d'oiseaux et de poisson.

III.2 Principe général de la méthode :

L'optimisation par essaim de particules est une technique évolutionnaire qui utilise "une population" de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cette technique est une méthode stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social. Dans l'OEP, chaque individu de la population est dit (particule), tandis que la population est connue sous le nom de (swarm). Il faut noter, que la particule peut bénéficier des mouvements des autres particules dans la même population pour ajuster sa position et sa vitesse durant le processus d'optimisation. Chaque individu utilise l'information locale à laquelle il peut accéder sur le déplacement de ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles très simples comme "rester proche des autres individus", "aller dans la même direction", "aller à la même vitesse" suffisent pour maintenir la cohésion du groupe tout entier [10]. Le processus de recherche est basé sur deux règles :

- Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage. À partir de ces informations, la particule va suivre une tendance faite, d'une part, de sa volonté à retourner vers sa solution optimale, et d'autre part, de son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage.
- Chaque particule est informée du meilleur point connu au sein de son voisinage et elle va tendre à aller vers ce point (c'est-à-dire qu'à partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules va, normalement, converger vers la solution optimale globale du problème traité).

La figure suivante illustre le principe du déplacement de la particule en PSO.

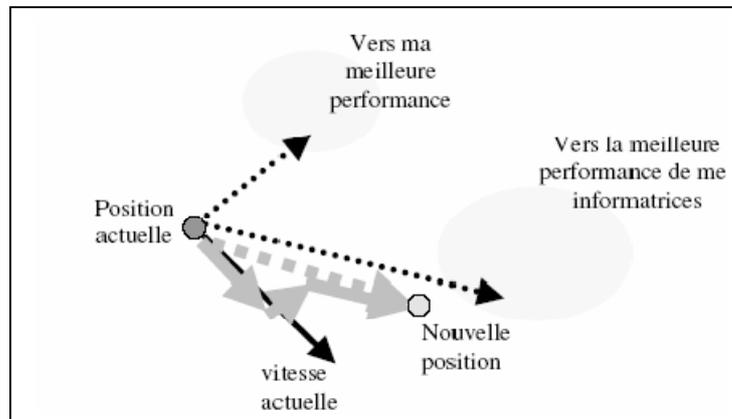


Fig. III.2 : Schéma de principe du déplacement d'une particule en PSO

Au départ, un essaim de particules est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance.

A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse de déplacement. Pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

Donc, cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux, entre autre, la notion de l'efficacité est due à la collaboration plutôt qu'à la compétition.

Elle a d'ailleurs des similarités avec les algorithmes de colonies de fourmis, qui s'appuient eux aussi sur le concept d'auto-organisation. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu

intelligents puisse posséder une organisation globale complexe.

III.3 Formalisation mathématique de la méthode :

Considérons une population (swarm) composée de K particules. Les équations formalisant le mouvement des particules sont données par [11] :

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{best,i} - p_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best} - p_i(t)) \quad (1)$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) \cdot \Delta + v_i(t+1) \cdot \Delta \quad (2)$$

Chaque particule $(i = 1, \dots, K)$ dans le swarm est caractérisé par :

- Sa position courante $p_i(t) \in \mathbb{R}^n$, qui réfère à une solution candidate pour le problème d'optimisation considéré à l'itération t .
- Sa vitesse $v_i(t) \in \mathbb{R}^n$.
- La meilleure position $p_{best,i}(t) \in \mathbb{R}^n$ identifiée durant sa trajectoire antécédente. Soit $g_{best}(t) \in \mathbb{R}^n$ la meilleure position globale identifiée dans le processus de recherche pour toutes les particules dans le swarm. La position optimal est mesurée avec une fonction dite *fitness* définit suivant le problème d'optimisation. Durant le processus d'optimisation, les particules se déplacent suivant les équations (1) et (2).
- r_1 et r_2 sont des variables aléatoires générés d'une distribution uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$ afin de fournir un poids stochastique aux différentes composantes participant dans la définition de la vitesse de la particule.
- c_1 et c_2 sont deux constantes d'accélération régulant les vitesses relatives par rapport aux meilleurs positions locales et globales. Ces paramètres sont considérés comme des facteurs d'échelle utilisés pour déterminer les mouvements relatifs de la meilleure position de la particule ainsi que de la meilleure position globale. Ce sont des facteurs qui déterminent le degré d'influence des positions passées de la particule elle mêmes et celles des autres particules dans le swarm.
- L'inertie w qui est utilisée comme un compromis entre l'exploration locale et globale du swarm. Des valeurs élevées de ce paramètre permettent une bonne exploration globale, tandis que pour des valeurs minimales une recherche fine est réalisée.

L'équation (III.1) permet le calcul de la vitesse à l'itération $t+1$ pour chaque particule en combinant linéairement la position et la vitesse (à l'itération t) et les distances qui séparent la position courante de la particule de son antécédente meilleure position et la meilleure position globale, respectivement. La mise à jour de la position de la particule est réalisée à travers

l'équation (2). Les équations (1) et (2) sont itérées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte [10].

La Figure (III.3) présente un schéma de principe résumant les explications ci-dessus :

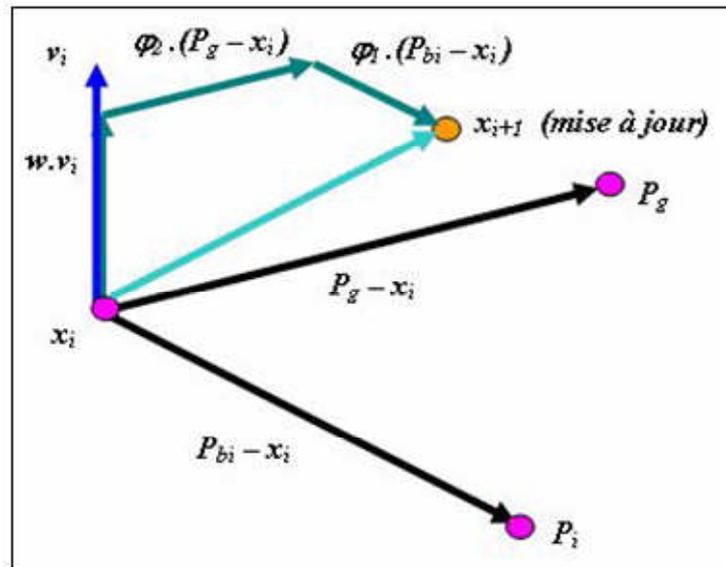


Fig. III.3 : Schéma vectorielle du déplacement d'une particule

III.4 Paramètres importants de l'OEP :

Un essaim de particules est caractérisé par :

- a) le nombre de particules de l'essaim, noté K ;
- c) la topologie et la taille du voisinage d'une particule qui définissent son réseau social ;
- d) l'inertie d'une particule, notée w ;
- e) les coefficients de confiance, notés ρ_1 et ρ_2 , qui pondèrent le comportement conservateur (i.e. la tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (i.e. la tendance à suivre le voisinage).

III.4.1 Nombre de particules :

C'est la quantité de particules allouées à la résolution du problème et qui dépend essentiellement de deux paramètres :

La *taille* de l'espace de recherche et le *rapport* entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

III.4.2 Le voisinage :

Le voisinage constitue la structure du réseau social, à l'intérieur de laquelle les particules communiquent entre elles. La topologie du voisinage définit avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer. Différents voisinages ont été étudiés et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche.

Il y a deux grandes méthodes pour définir le voisinage d'une particule, soit un voisinage « géographique », qui doit être recalculé à chaque pas de temps, et qui suppose l'existence d'une distance dans l'espace de recherche, soit un voisinage « social » défini une seule fois, et qui est le plus utilisé, pour plusieurs raisons :

- Il est plus simple à programmer.
- Il est moins coûteux en temps de calcul.

De toute façon, en cas de convergence, un voisinage social tend à devenir un voisinage géographique. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées :

- *Topologie en étoile* (figure 4a) : dans cette topologie, le réseau social est complet, et chaque particule est attirée vers la meilleure particule en communiquant avec toutes les autres particules (l'optimum du voisinage est l'optimum global).

- *Topologie en anneau* (figure 4b) : chaque particule communique avec n voisines immédiates (généralement $n = 3$), et chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local. C'est la topologie la plus utilisée.

- *Topologie en rayon* (figure 4c) : une particule "centrale" est connectée à toutes les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration, l'information est propagée aux autres.

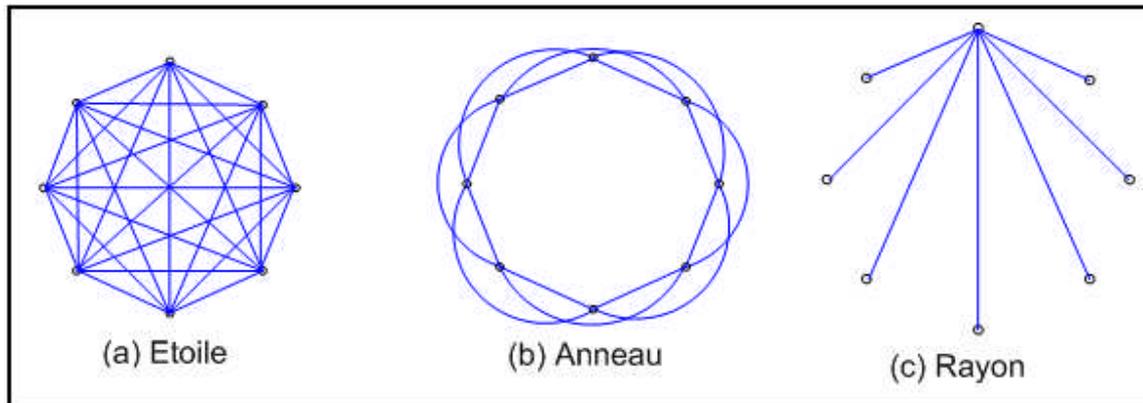


Fig.III.4 : les topologies du voisinage d'un essaim.

III.4.3 Coefficient de confiance :

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Les variables aléatoires ρ_1 et ρ_2 peuvent être définies [10] de la façon suivante :

$$\begin{cases} \rho_1 = r_1 \cdot c_1 \\ \rho_2 = r_2 \cdot c_2 \end{cases}$$

Où r_1 et r_2 suivent une loi de distribution uniforme sur $[0...1]$ et c_1 et c_2 sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation $c_1 + c_2 \leq 4$, soit :

c_1 : la correction locale.

c_2 : la correction globale.

Un choix judicieux de ces deux paramètres permet éventuellement d'avoir une meilleure convergence, ainsi qu'une recherche diversifiée, soit un balayage global de l'espace de recherche.

III.4.4 Vitesse maximale et coefficient de constriction :

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement ou trop lentement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il est peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale (v_{max}) pour améliorer la convergence de l'algorithme. Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction (k) qui permet de resserrer l'hyper-espace de recherche.

L'équation de la vitesse [10] devient ainsi :

$$v(t+1) = [v(t) + \rho_1 \cdot (p_{best} - x(t)) + \rho_2 \cdot (g_{best} - x(t))] \cdot k \quad (3)$$

Où :

$(v_i + 1)$: est la vitesse de la $i^{\text{ème}}$ particule à l'instant $(t+1)$.

k : le coefficient de constriction.

ρ_1 et ρ_2 : les coefficients de confiance.

X_{pbest_i} : la position de la meilleure solution par laquelle est passée la $i^{\text{ème}}$ particule.

X_{vbest_i} : la position de la meilleure solution connue dans le voisinage de la $i^{\text{ème}}$ particule.

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} w = 1 - \frac{iter}{max_iter} + \frac{rand}{max_iter} \\ \rho = \rho_1 + \rho_2 > 4. \end{array} \right. \quad (4)$$

L'utilisation d'un coefficient de constriction donne généralement un meilleur taux de convergence sans avoir à fixer de vitesse maximale [10]. Cependant, dans certains cas, le coefficient de constriction seul ne permet pas la convergence vers la solution optimale pour un nombre d'itérations donné.

III.4.5 Facteur d'inertie :

Le facteur d'inertie w permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de la méthode. Une grande valeur de w (>1) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc, une exploration globale. En revanche, une faible valeur de w (<1) est synonyme de faible amplitude de mouvement et donc, une exploration locale. Fixer ce facteur, revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Le calcul de la vitesse est alors défini par :

$$(v_i + 1) = w * (v_i) + rand * (pbest_i - (x_i)) + rand * (vbest_i - (x_i)) \quad (5)$$

La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyper-espace exploré et aucune valeur de w ne peut garantir la convergence vers la solution optimale.

Les études ont démontré une meilleure convergence pour $w \in [0.8, 1.2]$. Au delà de 1.2, l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger.

Enfin, il est également possible de faire diminuer le facteur d'inertie au cours du temps, c'est-à-dire faire varier ce paramètre au cours du déroulement de l'algorithme pour assurer une recherche diversifiée. De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissante linéairement de 0.9 à 0.4.

La position des particules ainsi que leur vitesse initiale doivent être initialisées aléatoirement selon une loi uniforme sur $[0..1]$.

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération (que nous noterons $nbIter_{max}$).

L'algorithme doit alors arrêter de s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivants soit atteint :

- $nbIter_{max}$ a été atteint ;
- la variation de la vitesse est proche de 0 ;
- la fitness de la solution est suffisante.

III.5 Déroulement de l'algorithme :

Chaque particule bouge dans l'espace de recherche, sachant qu'elle possède initialement une vitesse et une petite mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance, en position et en valeur. Donc chaque particule dispose d'un groupe d'informaticiens, historiquement appelé son voisinage. A partir de ces informations, la particule doit décider de son prochain mouvement. Le déroulement des événements qui permettent la prise de cette décision peuvent être classés dans l'ordre suivant :

Première étape : on initialise l'essaim de particules dans l'espace de recherche. On peut le faire soit de manière aléatoire (ce qui n'est pas forcément si simple selon la forme de l'espace de recherche), soit de manière régulière, en particulier sur la frontière. En général, le plus efficace est une combinaison des deux [11]. On initialise également la vitesse de chaque particule.

Deuxième étape : évaluer la fonction fitness de chaque particule dans l'espace de recherche, de telle façon que cette fonction soit propre au système à optimiser, cependant, le reste de l'optimisation est indépendant du système physique qu'on veut optimiser.

Troisième étape : comparer la fitness de chaque particule avec la fitness précédente (f_{best}), si sa valeur est meilleure alors, on remplace f_{best} par cette valeur, on garde sa position dans l'espace de recherche.

Quatrième étape : comparer la fitness évaluée avec la meilleure fitness de toutes les particules (g_{best}), si cette valeur est meilleure, alors on la garde comme g_{best} tout en gardant son index.

Cinquième étape : le renouvellement de la position et de la vitesse de chaque particule se fera selon les équations (5) et (2).

Sixième étape : si le critère d'arrêt n'est pas encore satisfait, on revient à l'étape 2, sinon, on arrête le processus.

Les étapes citées ci-dessus peuvent être mieux exposées par l'algorithme suivant (Algorithme avec un voisinage en étoile) :

[Les variables et paramètres de l'algorithme]

N nombre de particules

\vec{x}_i position de la particule P_i

\vec{v}_i vitesse de la particule P_i

$pbest_i$ meilleure fitness obtenue pour la particule P_i

\vec{x}_{pbest_i} position de la particule P_i pour la meilleure fitness

\vec{x}_{gbest} position de la particule ayant la meilleure fitness de toutes

ρ_1, ρ_2 valeurs aléatoires positives

[Initialisations]
 Initialiser aléatoirement la population

[Traitement]
Répéter
 Pour i de 1 à N faire
 Si $(F(\vec{x}_i) > pbest_i)$ **Alors**
 $pbest_i \leftarrow F(\vec{x}_i)$
 $\vec{x}_{pbest_i} \leftarrow \vec{x}_i$
 Fin Si
 Si $(F(\vec{x}_i) > \vec{x}_{gbest})$ **Alors**
 $gbest \leftarrow F(\vec{x}_i)$
 $\vec{x}_{gbest} \leftarrow \vec{x}_i$
 Fin Si
 Fin Pour
 Pour i de 1 à N faire
 $\vec{v}_i \leftarrow \vec{v}_i + \rho_1 (\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i) + \rho_2 (\vec{x}_{gbest} - \vec{x}_i)$
 $\vec{x}_i \leftarrow \vec{x}_i + \vec{v}_i$
 Fin Pour
jusqu'à ce que (le processus converge)

- Algorithme avec un voisinage en étoile

Ou encore par l'organigramme suivant :

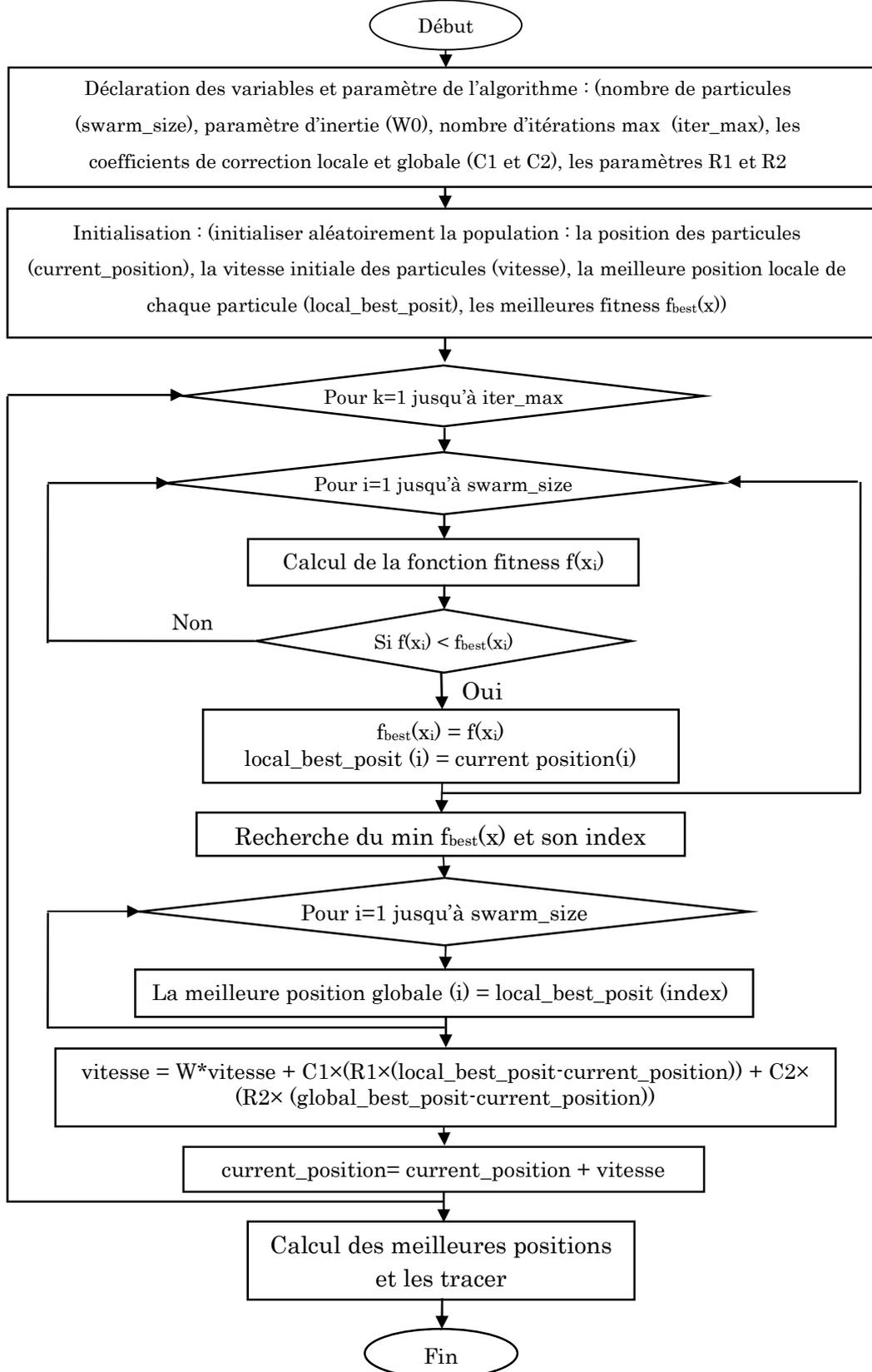


Fig. III.5 : Organigramme de l'OEP

III.6 Exemple d'application :

Nous avons choisi de chercher la minimisation de la fonction F définie par :

$$F(x, y) = 100*(y-x^2)^2 + (1-x)^2$$

Cette fonction admet un optimum global défini au point (1,1) tel que $F(1,1) = 0$.

Maintenant, on va résoudre ce problème avec la méthode OEP, et en donnant quatre cas d'exécution où les paramètres de contrôle de la méthode seront changés dans chaque cas, et ce, pour voir l'effet et l'importance du réglage de ces paramètres afin d'avoir des résultats plus précis.

- **le premier cas** : Nombre de particules insuffisant

On prend : l'espace de recherche 6×6

Nombre de particule $N = 5$

Correction locale $C1 = 1.5$

Correction globale $C2 = 1.9$

Facteur d'inertie $w = 0.9$

On obtient :

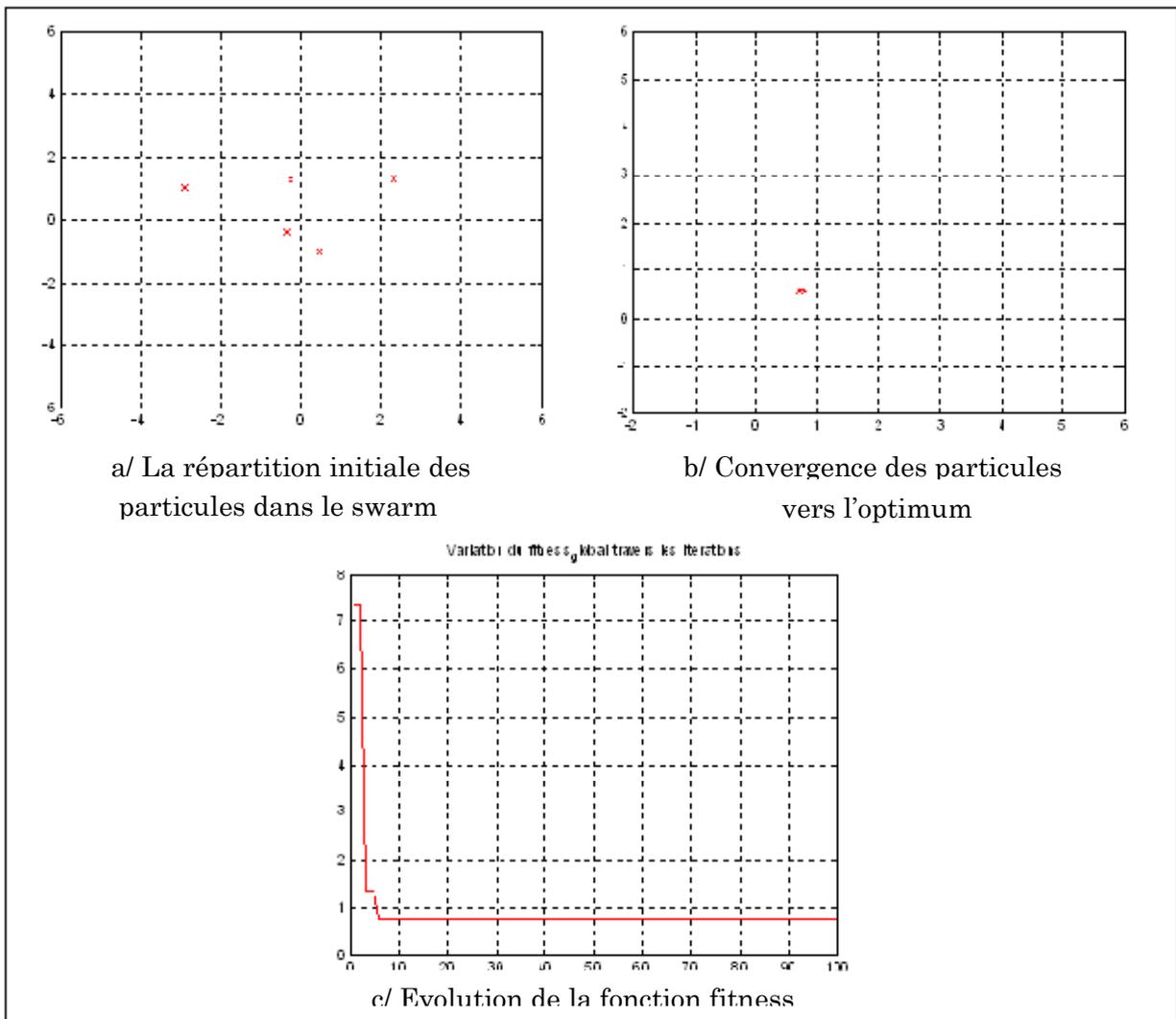


Fig. III.6 : Cas d'un nombre de particules insuffisant.

Avec :

$$x = 0.7618 \quad y = 0.5802$$

et une erreur de : 0.0567

- **le deuxième cas** : facteur d'inertie important

On prend : l'espace de recherche 6×6

Nombre de particule $N = 40$

Correction locale $C1 = 1.5$

Correction globale $C2 = 1.9$

Facteur d'inertie $w = 1.5$

On obtient :

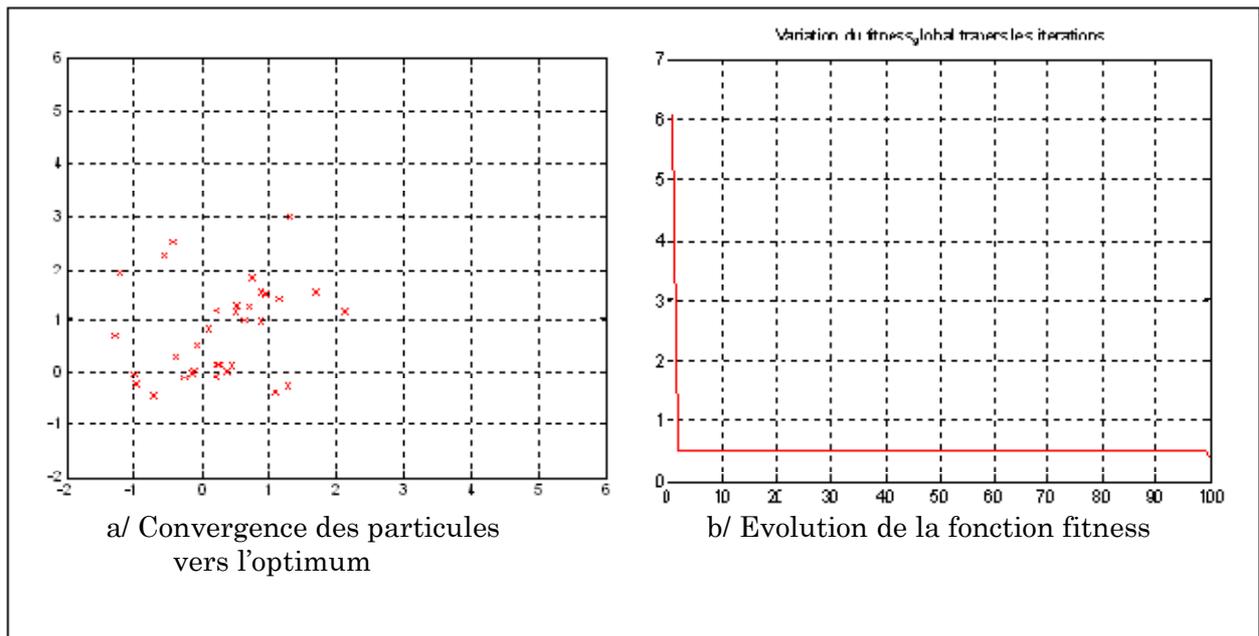


Fig. III.7 : Cas d'un facteur d'inertie très grand.

Avec :

$$x = 0.5171, \quad y = 0.3088$$

et une erreur de : 0.40430

- **le troisième cas** : dimension de l'espace de recherche très grande

On prend : l'espace de recherche 30×30

Nombre de particule $N = 40$

Correction locale $C1 = 1.5$

Correction globale $C2 = 1.9$

Facteur d'inertie $w = 0.9$

On obtient :

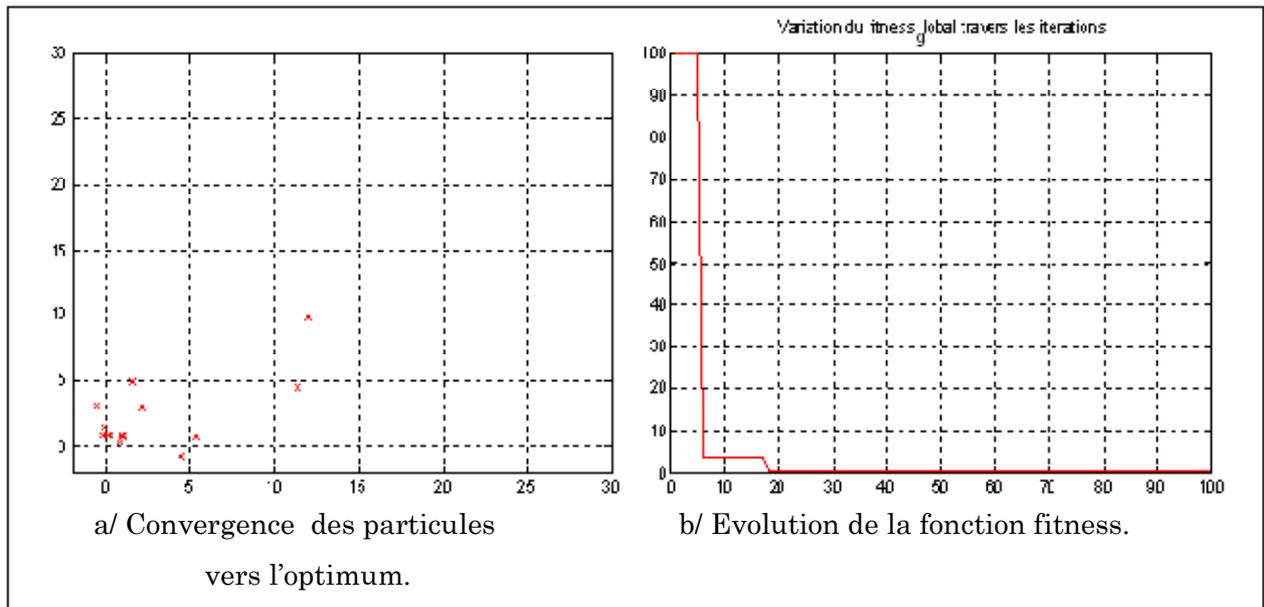


Fig. III.8 : Cas d'un espace de recherche vaste.

Avec :

$$x = 0.9755, \quad y = 0.9517$$

et une erreur de : $5.9924e-004$

- **le quatrième cas** : compromis entre l'ensemble des paramètres

On prend : l'espace de recherche 6×6

Nombre de particule $N = 40$

Correction locale $C1 = 1.5$

Correction globale $C2 = 1.9$

Facteur d'inertie $w = 0.9$

On obtient :

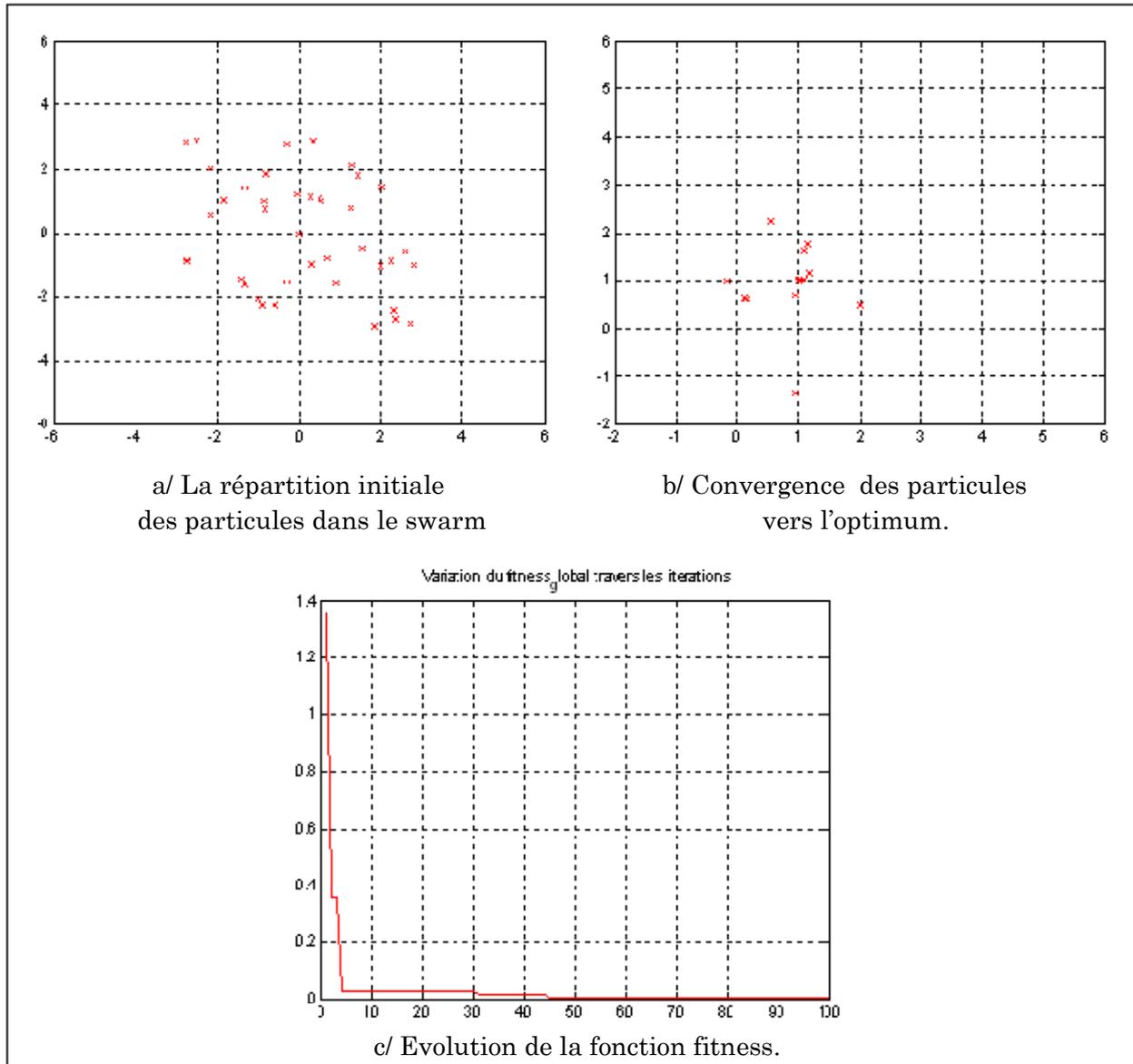


Fig. III.9 : Cas où les paramètres de contrôle sont assez réglés.

Avec :

$$x = 1.0000, \quad y = 1.0000$$

et une erreur de : $1.5377e-011$

Discussion :

D'après les quatre figures et les valeurs de x , y et l'erreur, on remarque que chaque paramètre a son poids pour que les résultats soient précis, d'ailleurs c'est pour cela qu'il faut exécuter le programme plusieurs fois et fur à mesure on améliore les paramètres pour atteindre une erreur négligeable (convergence de la fitness).

Conclusion :

Ce chapitre a été entièrement consacré à l'étude de la méthode d'optimisation par PSO et à ses différentes phases. Comme on a traité un exemple d'optimisation à la fin du chapitre pour voir l'efficacité et la robustesse du PSO, et les résultats obtenus sont assez meilleurs pour lui faire confiance et entamer des applications de problèmes plus complexes, et c'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre.

Chapitre IV :

Simulation et Résultats

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrirons les démarches que nous avons utilisées, et les résultats obtenus afin d'optimiser le diagramme de rayonnement des réseaux d'antennes par l'algorithme PSO.

Pour cela nous intervenons sur les paramètres de positionnement et d'alimentation des différents éléments constituant le réseau pour répondre aux différentes exigences concernant la largeur du lobe principale et le niveau des lobes secondaires.

Mais avant d'entamer l'étape des applications, on donne un aperçu sur la notion du gabarit qu'on a introduit dans nos programmes.

IV.2 Notion de gabarit :

IV.2.1 Définition :

Le gabarit est la fonction idéale que le diagramme de rayonnement devra suivre. Cependant cette fonction est définie par plusieurs paramètres dans l'espace. Ces paramètres sont représentés sur la Figure (IV.1) pour toute la sphère d'observation, et sur la Figure (IV.2) pour une coupe réalisée à un exemple de gabarit de puissance.

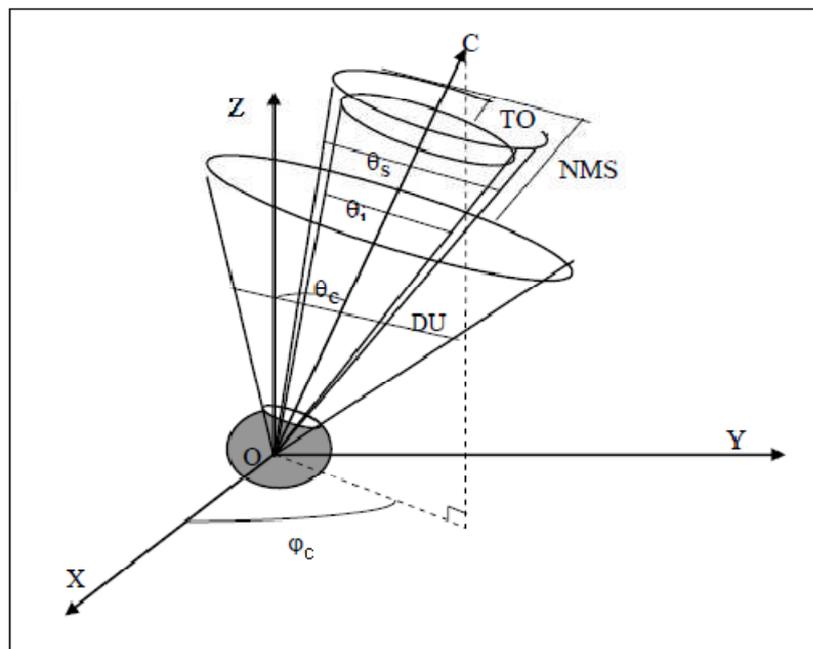


Fig. IV.1 : Gabarit défini sur toute la sphère d'observation.

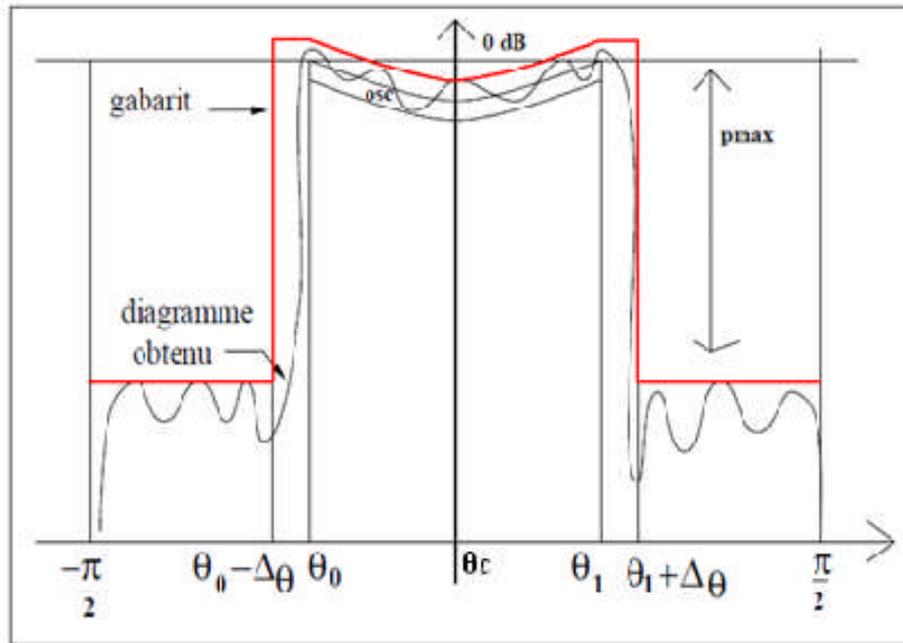


Fig. IV.2 : Gabarit en puissance défini sur toute la sphère d'observation.

Le gabarit étant défini en décibel, on a évidemment les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_{\max} = 10 \cdot \log_{10}(\text{lobs}) \\ \text{osc} = 10 \cdot \log_{10}(\text{lobp}) \end{cases}$$

Les caractéristiques du gabarit imposé sont

- Taux d'ondulation, TO en décibels,
- Niveau maximum des lobes secondaires, NMS en décibels,
- Etendue angulaire minimale du lobe principal, ($\theta_i = \theta_1 - \theta_0$)
- Etendue angulaire maximale du lobe principal, ($\theta_s = \theta_1 - \theta_0 + 2\Delta\theta$)
- Domaine utile, DU en degrés ($-90^\circ, +90^\circ$).
- Angle de dépointage, AP : θ_c en degrés,
- Plan principal de rayonnement, PR : φ_c en degrés.

IV.3 Applications :

Dans ce qui suit, on va donner trois types d'applications :

1°- Dans la première, on va appliquer le PSO sur un réseau uniforme, où on fixe la distance inter-sources et on cherche les pondérations des courants. On verra deux cas de simulation : pour $d=0.5\lambda$ et $d=0.7\lambda$

2°- Dans la deuxième application, on va appliquer le PSO sur un réseau non uniforme; on fixera les pondérations des courants et on cherche les distances entre les antennes.

3°- Enfin dans la dernière application, on va appliquer le PSO sur un réseau quelconque; le programme cherchera et les distances et les pondérations pour atteindre les exigences qu'on lui impose, et cela pour différents nombres d'antennes N.

Résultats des simulations :

Dans toutes les simulations, nous avons considéré un réseau linéaire de N antennes isotropes.

- Le niveau des lobes secondaires $R = -20$ dB
- L'ouverture du lobe principal $D = \pm 10^\circ$
- Nombre de générations (itérations) $K = 300$ (peut être varié pour améliorer les résultats).
- Nombre de particules $\text{swarm_size} = 40$ (peut être varié pour améliorer les résultats).
- Correction locale $C1 = 1.4$, correction globale $C2 = 1.7$
- Paramètre d'inertie $w = 0.95$ (peut aussi être varié pour améliorer les résultats).
- L'espace de recherche $\text{Deg} = [-\pi/2 \ \pi/2]$

Attention : On a pris $R = -20$ dB et $D = \pm 10^\circ$, pour répondre aux exigences du gabarit du Localiser définies et approuvées par l'OACI dans l'annexe 10, volume 1.

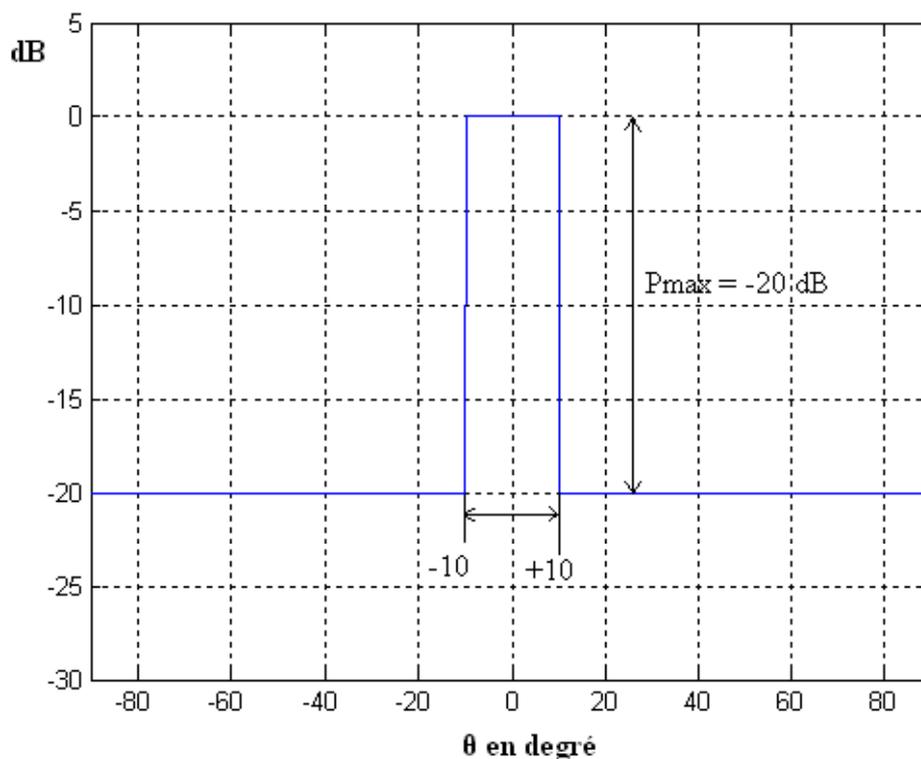


Fig. IV.3 : Gabarit du Localiser

IV.3.1 Application 1 : réseau uniforme

- Pour $d = 0.5 \lambda$ ($\lambda = c/f$)

- $N = 8$ éléments

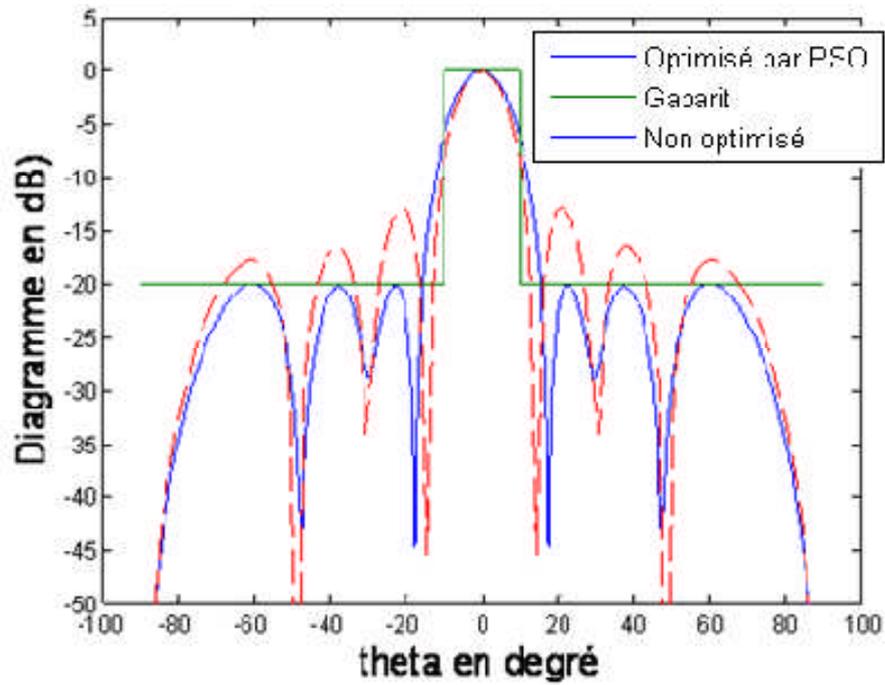


Fig. IV.4 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.5\lambda$, $N = 8$

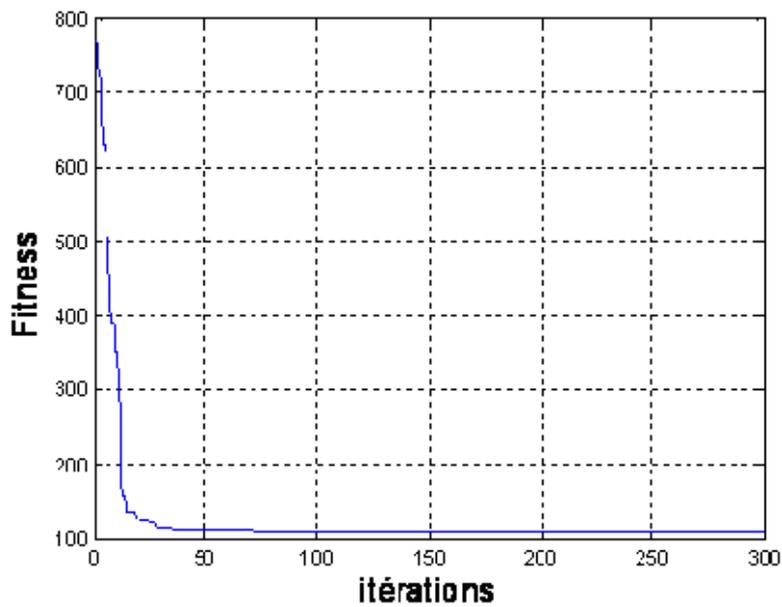


Fig. IV.5 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p =$ 4.0275 4.5912 5.5568 6.3159 6.4996 5.7014 3.7450 3.2194

- $N = 12$ éléments

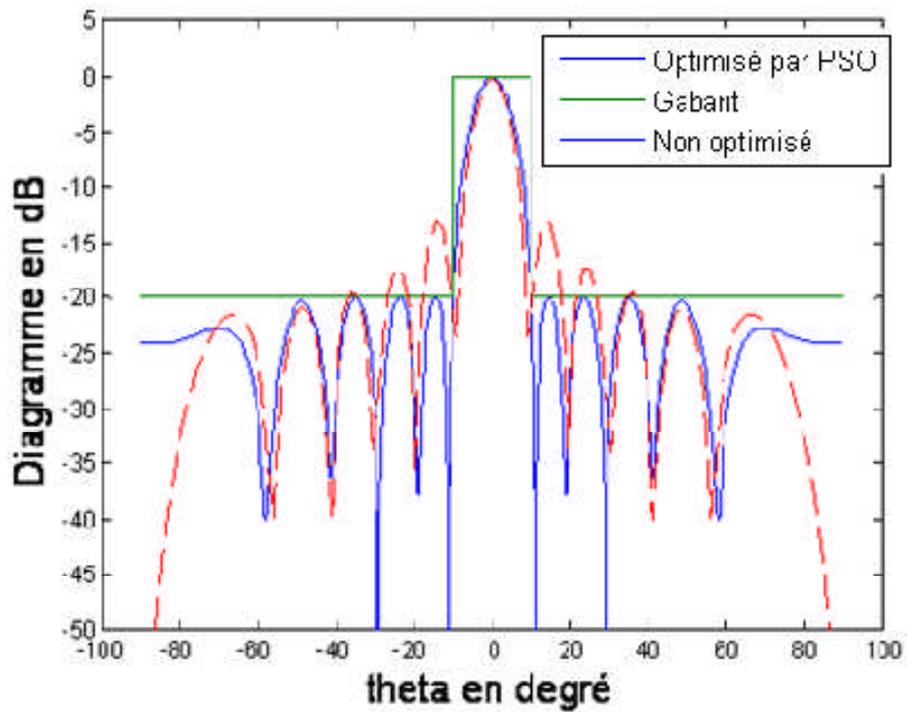


Fig. IV.6 : Diagrammes de rayonnement pour $d= 0.5\lambda$, $N = 12$

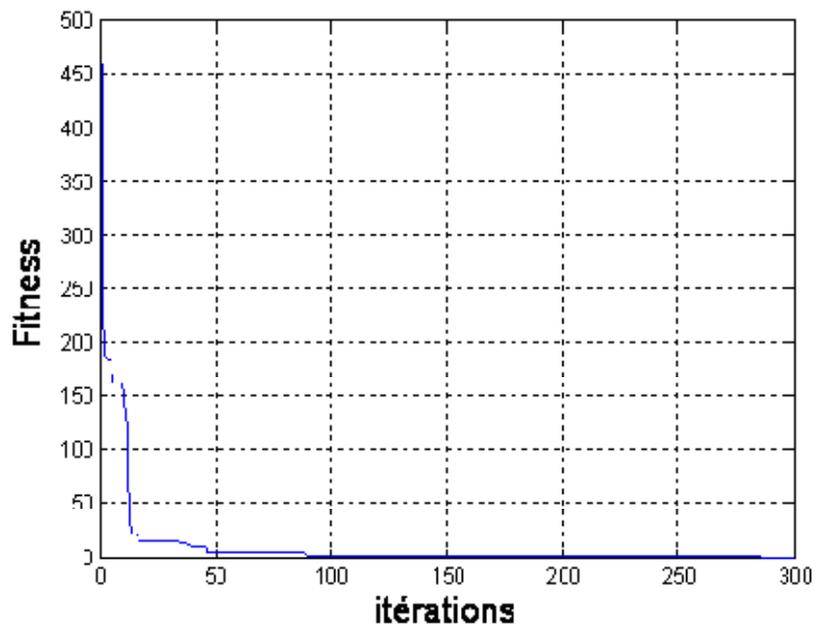


Fig. IV.7 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p =$ 6.8283 5.2509 6.6506 7.8792 8.7604 8.8178 9.7460 8.3190 8.1637
 5.4918 5.9931 4.9890

- $N = 20$ éléments

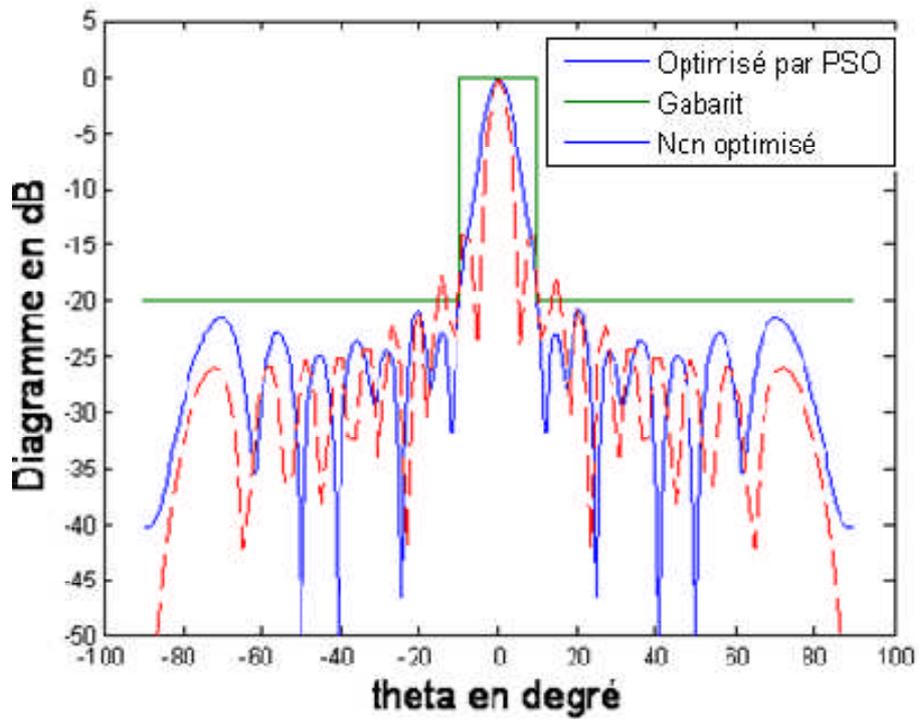


Fig. IV.8 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.5\lambda$, $N = 20$

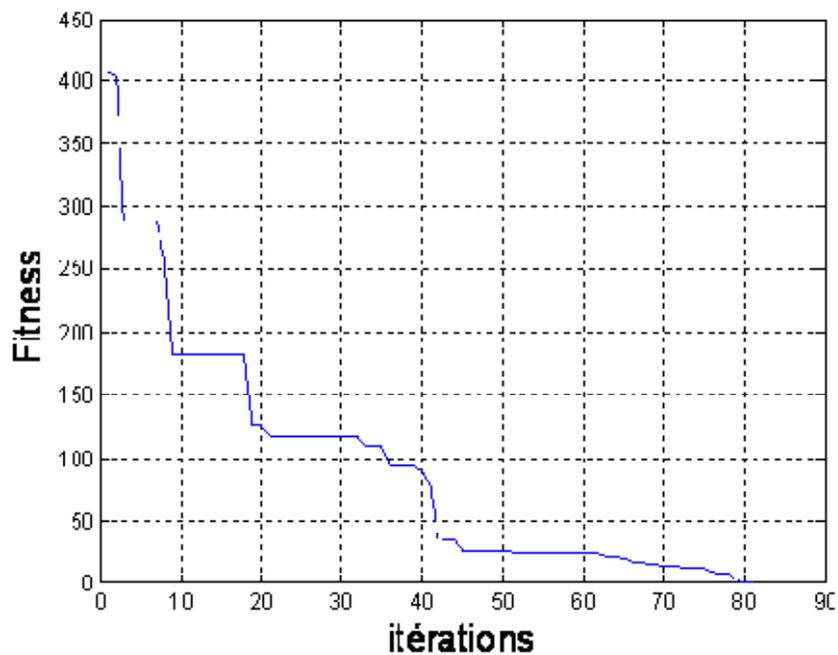


Fig. IV.9 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p =$ 8.4502 6.3338 11.4063 11.7085 13.9661 15.0467 16.2038 14.7335 11.6867
 11.7056 11.1617 9.7645 7.7999 6.9562 5.0318 1.4593 0.8215 7.2712
 2.6373 2.4898

Discussion :

Dans la première application, en ayant les distances inter-sources égales à 0.5λ , Les résultats obtenus avec la méthode OEP sont dans l'ensemble assez bons, donc cette méthode peut être utilisée lorsqu'il y a cette contrainte de distance qu'on doit fixer dès le début (réseau uniforme). Ce qu'on peut remarquer aussi, c'est que la fonction fitness converge mieux et plus rapidement plus le nombre d'antennes augmente ; Dans le cas de 8 éléments (fig. IV.5), la fonction fitness s'est stabilisée au niveau 107 même après 300 itérations, alors que dans le cas de 12 éléments, elle a convergé après 90 itérations (fig. IV.7), et après 80 itérations dans le cas de 20 éléments (fig. IV. 9). Donc cette méthode ne peut échapper à certains inconvénients comme celui de l'ouverture du lobe principal où il dépasse le gabarit à cause d'un nombre d'éléments insuffisant (fig. IV.4).

- Pour $d = 0.7 \lambda$ ($\lambda = c/f$)

- *N = 8 éléments*

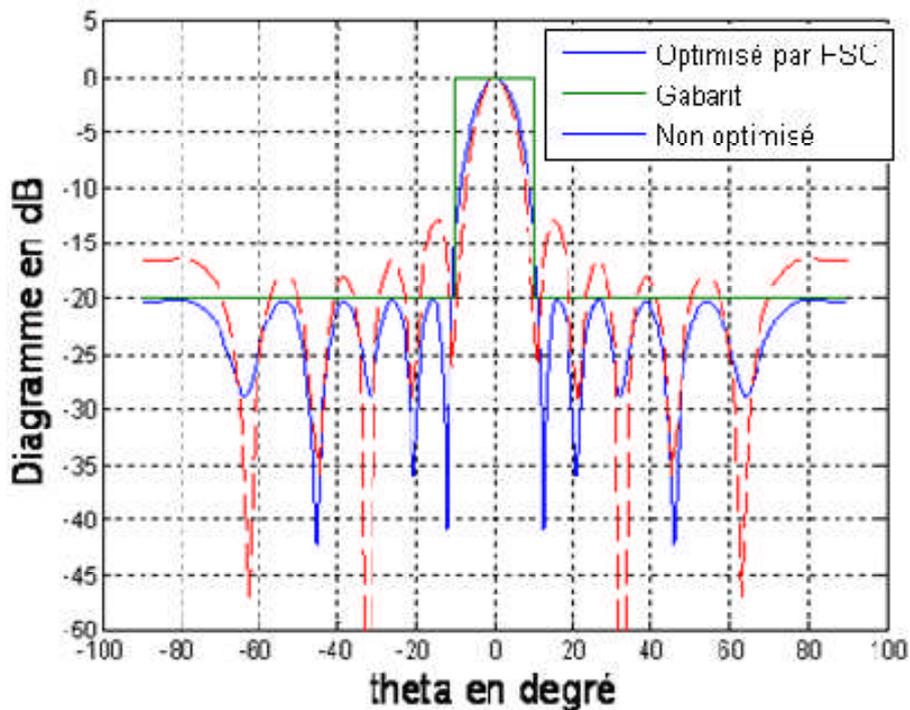


Fig. IV.10 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 8$

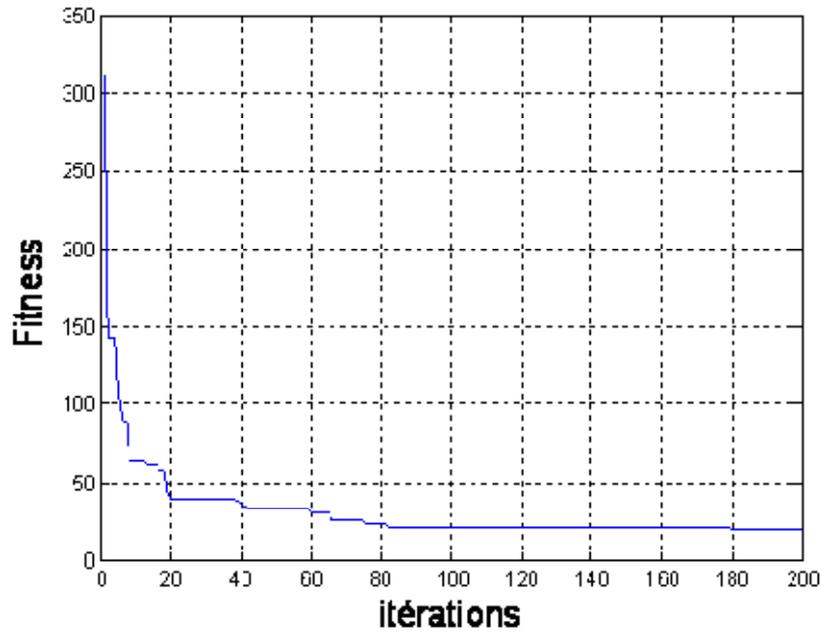
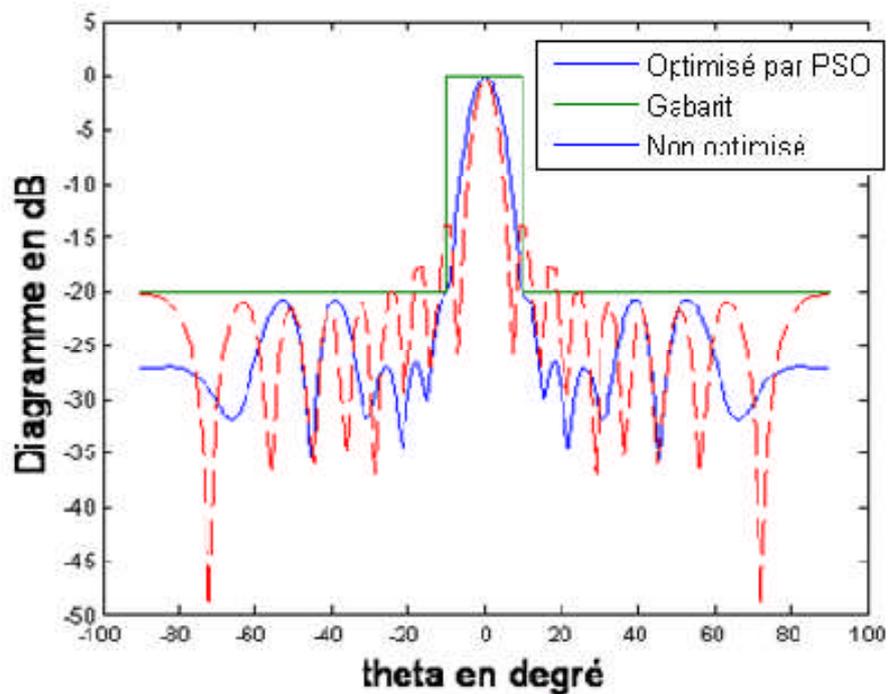


Fig. IV.11 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p =$ 3.7812 5.0575 6.3800 6.8709 7.8951 6.6983 4.6697 4.4543

- $N = 12$ éléments

Fig. IV.12 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 12$

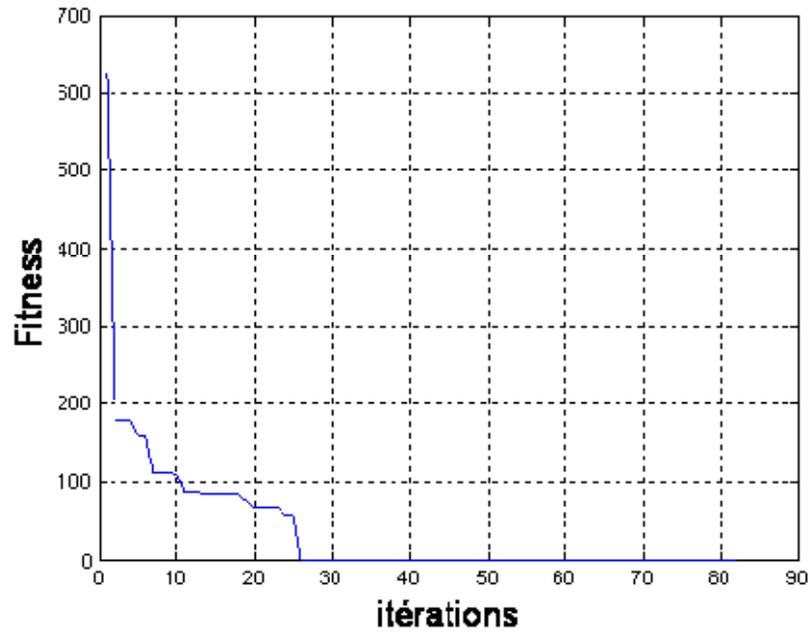
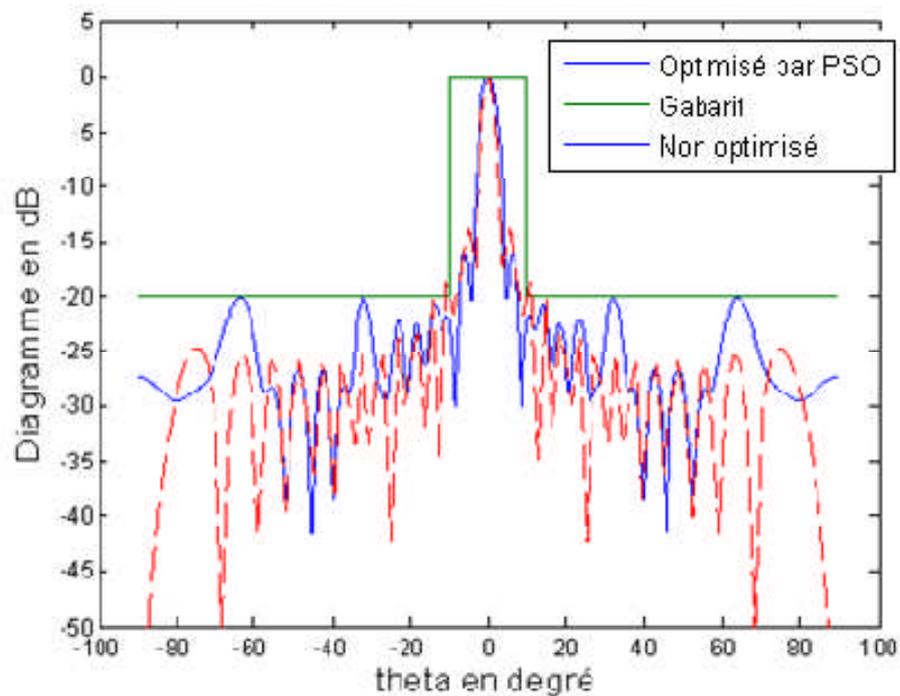


Fig. IV.13 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p = 4.1169 \quad 6.0729 \quad 9.6506 \quad 6.8408 \quad 14.5102 \quad 14.6461 \quad 17.0452 \quad 18.9375 \quad 14.7906$
 $13.3333 \quad 7.1456 \quad 5.2167$

- **$N = 20$ éléments**

Fig. IV.14 : Diagrammes de rayonnement pour $d = 0.7\lambda$, $N = 20$

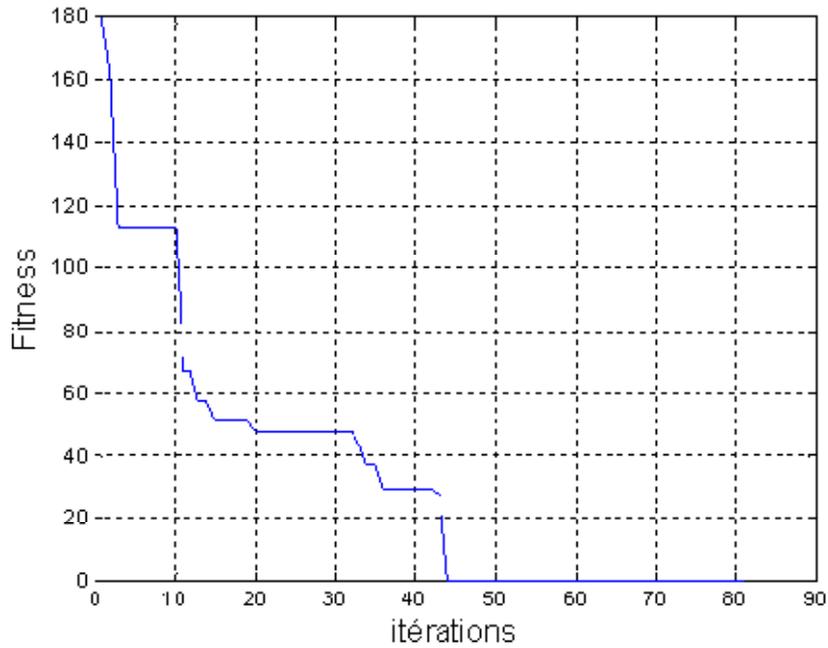


Fig. IV.15 : Evolution de la fonction fitness.

Pondérations des courants :

$I_p = 5.7886 \quad 5.7518 \quad 5.3322 \quad 7.1690 \quad 10.3289 \quad 9.6439 \quad 7.4681 \quad 7.5982 \quad 11.7548$
 $8.7194 \quad 8.8166 \quad 15.1183 \quad 13.2299 \quad 14.1580 \quad 13.9384 \quad 7.8416 \quad 9.8543 \quad 10.7228 \quad 8.3331$
 9.7074

Discussion :

Dans cette partie de la première application, où on a changé la distance inter-sources par 0.7λ , on a remarqué qu'avec 8 éléments, le diagramme obtenu a mieux respecté le gabarit (fig. VI.10) par rapport à celui du cas de 0.5λ (fig. IV.4), et que la fonction fitness atteint un niveau de convergence meilleur (fig. IV.11). Mais pour le cas de 20 éléments, (fig. IV.14), on voit l'apparition des lobes de réseau qui correspond à la règle qui dit que lorsqu'on la distance inter-sources dépasse 0.5λ , il ya apparition des lobes de réseau (paragraphe II.2.5. b). D'une façon générale, la méthode OEP se trouve assez efficaces pour les réseaux uniformes.

IV.3.2 Application 2 : réseau non uniforme

Pour cette application, nous prenons $I_p = 1$

- ***N = 8 éléments***

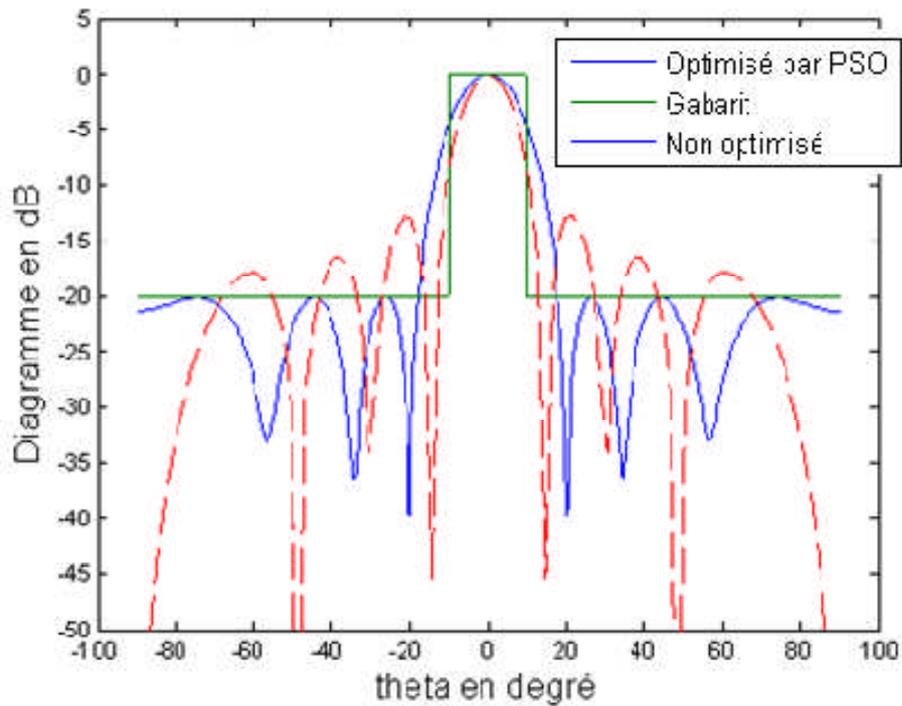


Fig. IV.16 : Diagrammes de rayonnement pour $I_p = 1$, $N = 8$

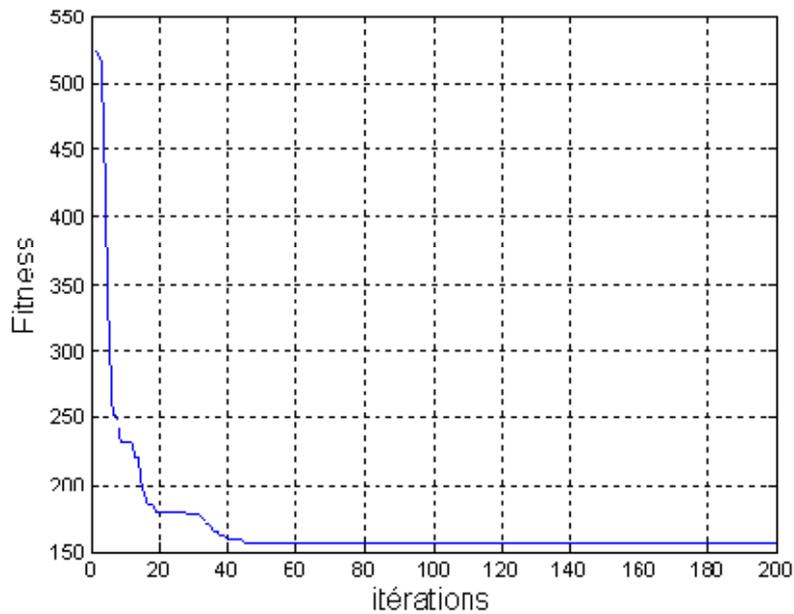


Fig. IV.17 : Evolution de la fonction fitness.

Les distances entre les éléments :

dx = 0 0.6003 0.9293 1.3789 1.5734 2.0507 2.3598 2.9216

- *N = 12 éléments*

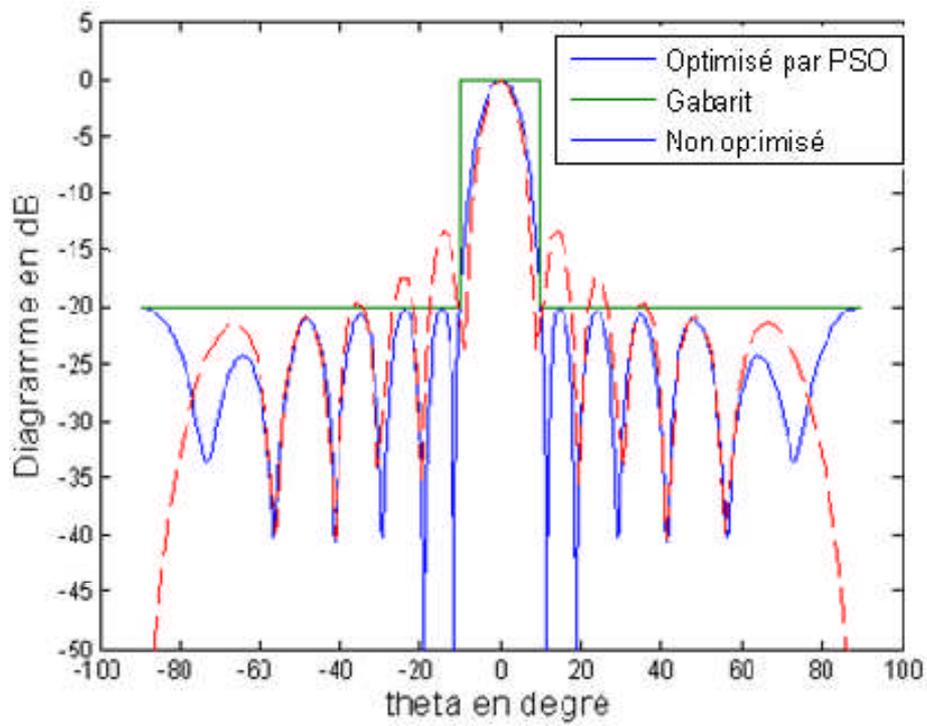


Fig. IV.18 : Diagrammes de rayonnement pour $I_P = 1$, $N = 12$

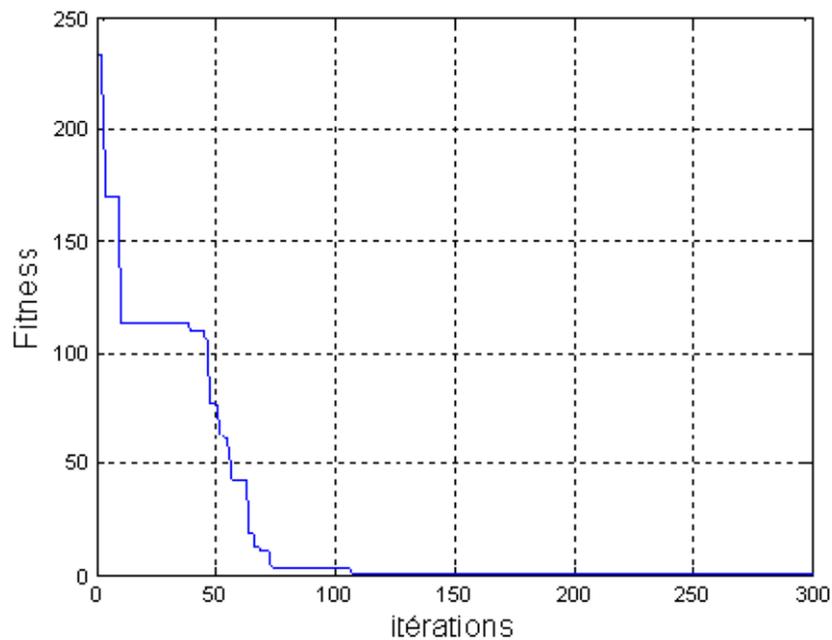


Fig. IV.19 : Evolution de la fonction fitness.

Les distances entre les éléments :

$\mathbf{dx} =$ 0 0.6570 1.2006 1.7222 2.0509 2.5549 2.8126 3.3091 3.6770
 4.1463 4.6963 5.3651

- *N = 20 éléments*

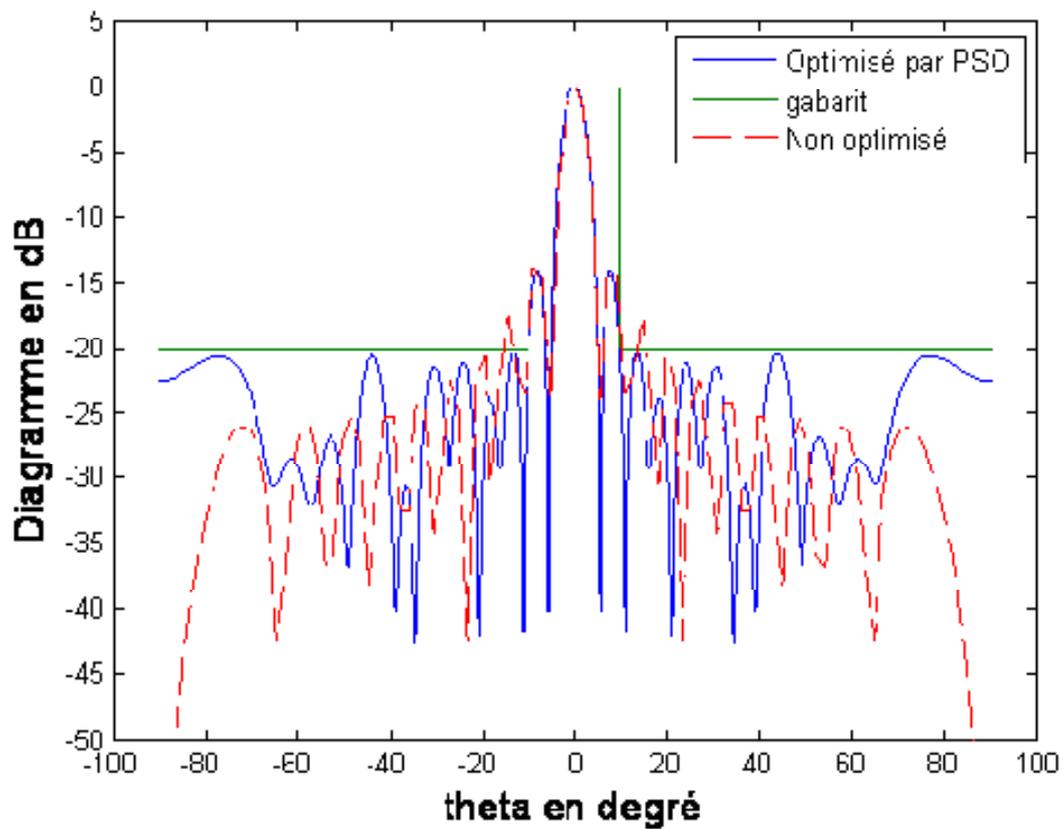


Fig. IV.20 : Diagrammes de rayonnement pour $I_p = 1$, $N = 20$

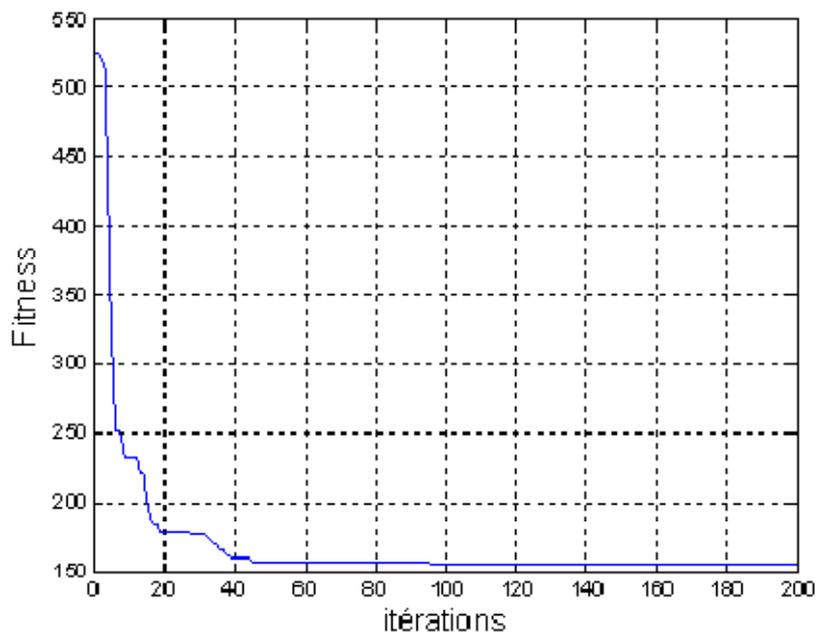


Fig. IV.21 : Evolution de la fonction fitness.

Les distances entre les éléments :

dx 0 0.6717 1.3210 1.8379 2.3167 2.8339 3.2622 3.8659 4.3949 4.9838 5.4917
 5.9314 6.3740 6.9986 7.4731 7.9278 8.4747 9.0394 9.6367 10.1868

Discussion :

Dans cette application, on remarque que pour le cas de 8 éléments, le diagramme dépasse le gabarit (fig. IV.16) à cause de nombre d'antenne insuffisant, par contre dans le cas de 12 éléments (fig. IV.18), le diagramme a bien respecté le gabarit. On constate aussi le nombre des lobes secondaires augmentent avec l'augmentation du nombre d'antennes.

Ce que nous pouvons dire, c'est que cette méthode se trouve limitée lorsqu'il s'agit de jouer sur un seul paramètre (pondération ou distance) pour répondre à plusieurs exigences, par contre le PSO s'avère plus intéressant et pratique lorsqu'il a la possibilité de jouer à la fois sur les pondérations et les distances inter-sources, et c'est ce que nous verrons dans la troisième application.

IV.3.3 Application 3 : cas du réseau quelconque

- $N = 8$ éléments

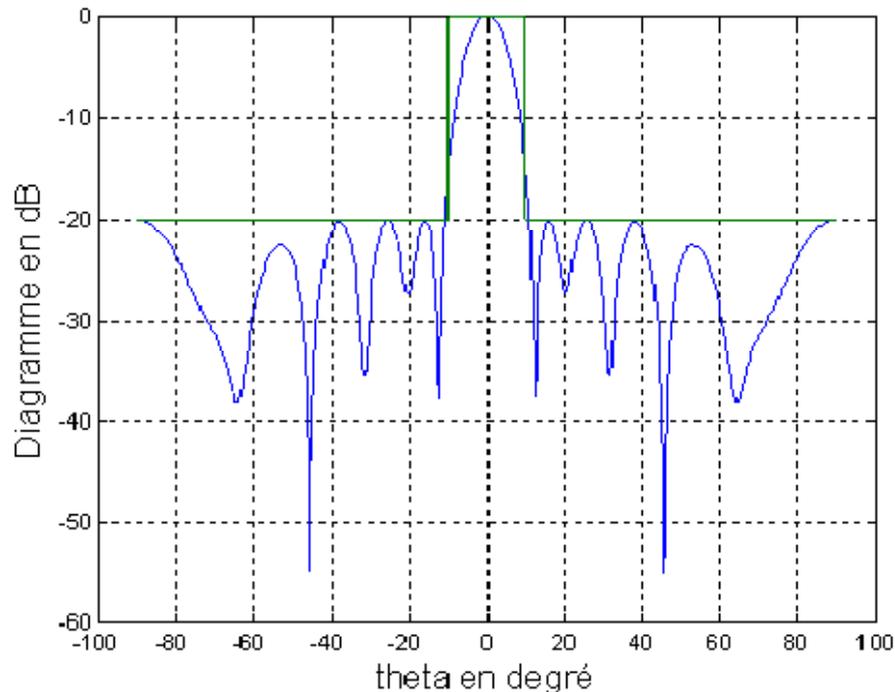


Fig. IV.22 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 8$

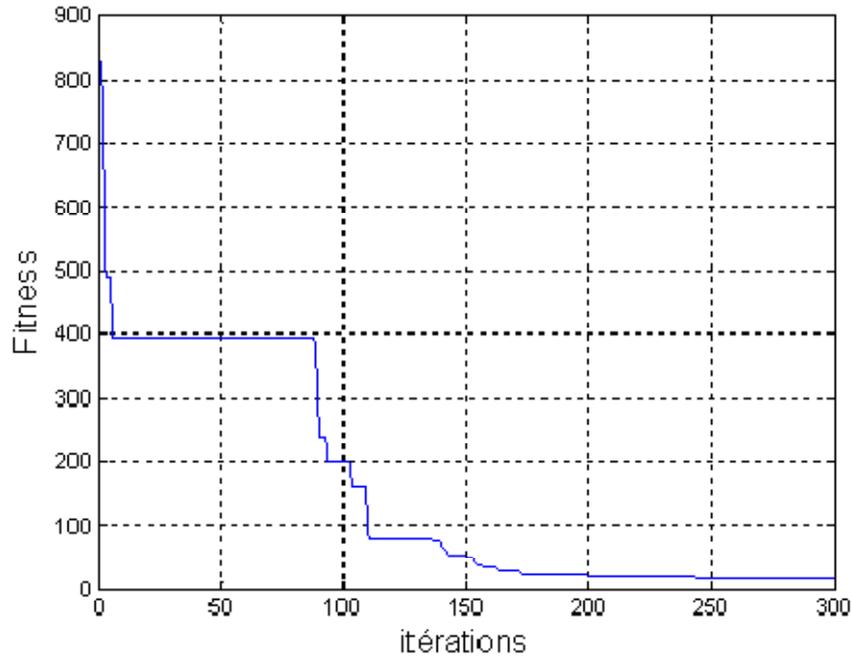
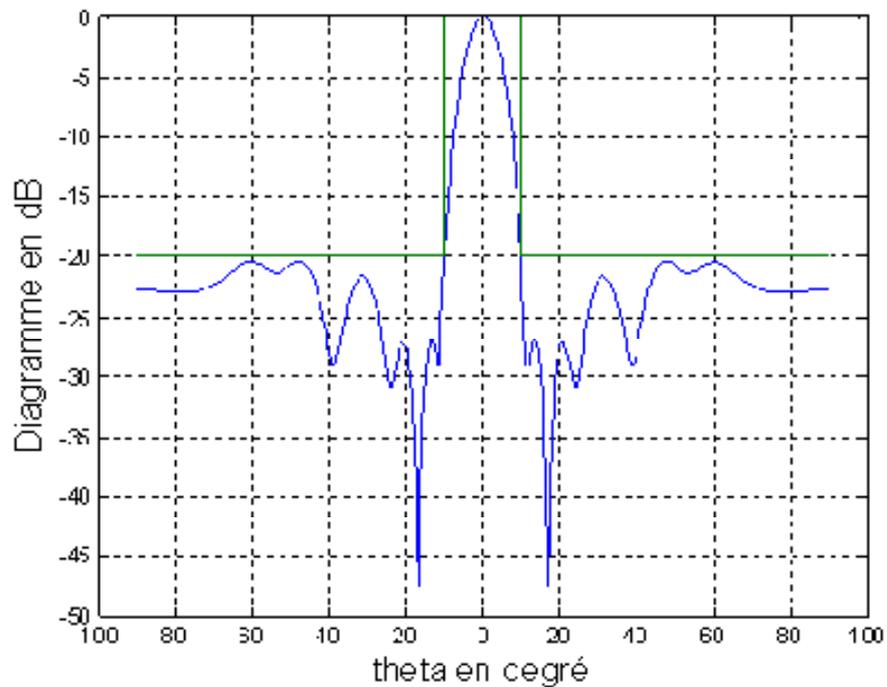


Fig. IV.23 : Evolution de la fonction fitness.

$\mathbf{I_p} =$ 5.1811 4.6722 8.9475 15.2421 16.4700 15.1441 12.1966 8.6432

$\mathbf{d_x} =$ 0 0.4319 1.0270 1.7765 2.5788 3.4314 4.2616 5.0325

- $N = 12$ éléments

Fig. IV.24 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 12$

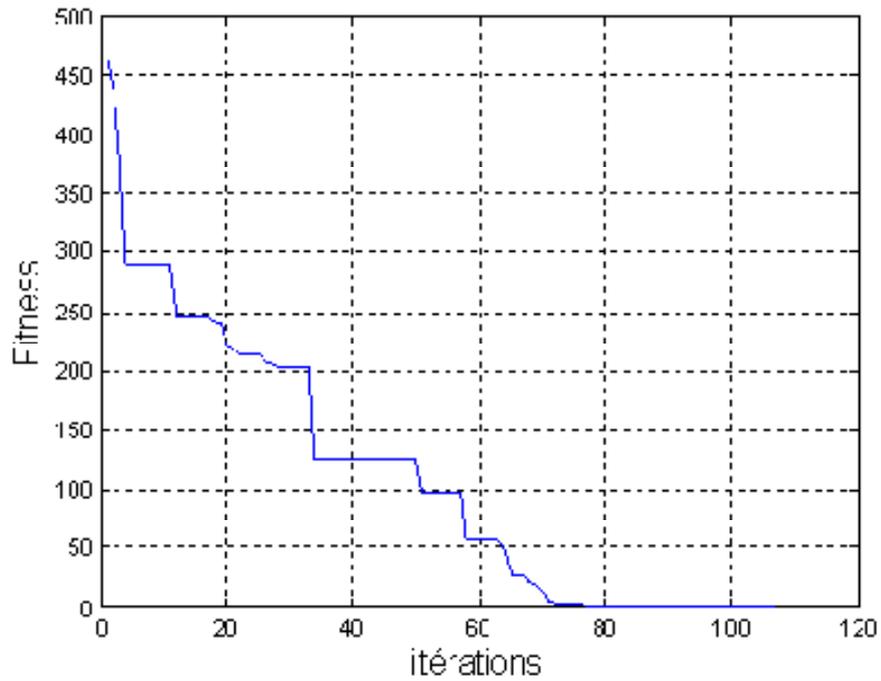


Fig. IV.25 : Evolution de la fonction fitness.

$I_p =$ 2.1908 5.8562 7.7320 13.4499 12.8455 16.3171 15.2710 6.7217 2.3926
 6.0216 5.6770 3.7290

$dx =$ 0 0.8305 1.4928 2.3518 3.0660 3.8339 4.5991 5.2976 5.2283 5.8335
 6.3330 6.8325

- $N = 20$ éléments

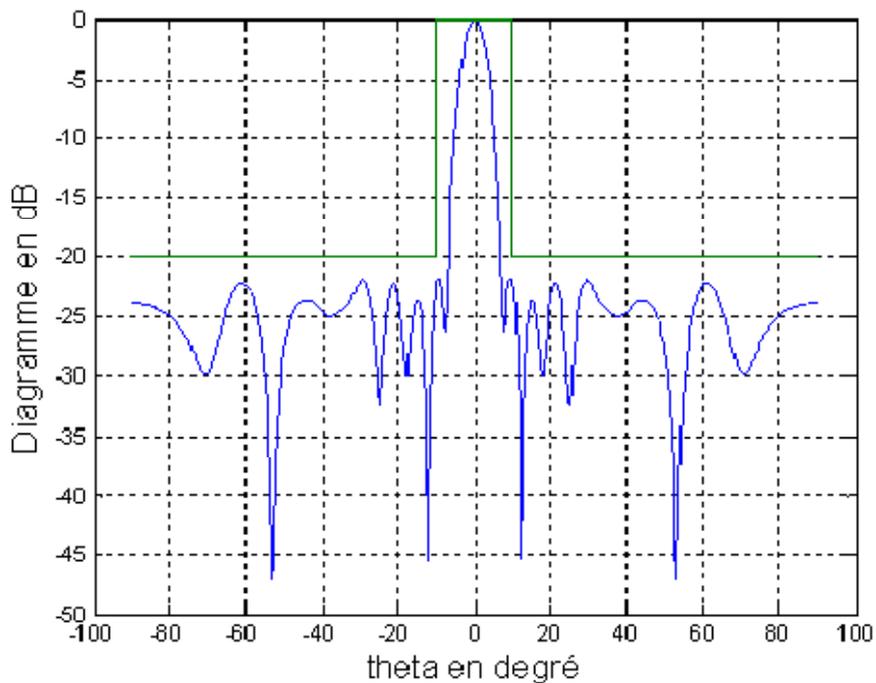


Fig. IV.26 : Diagrammes de rayonnement pour $N = 20$

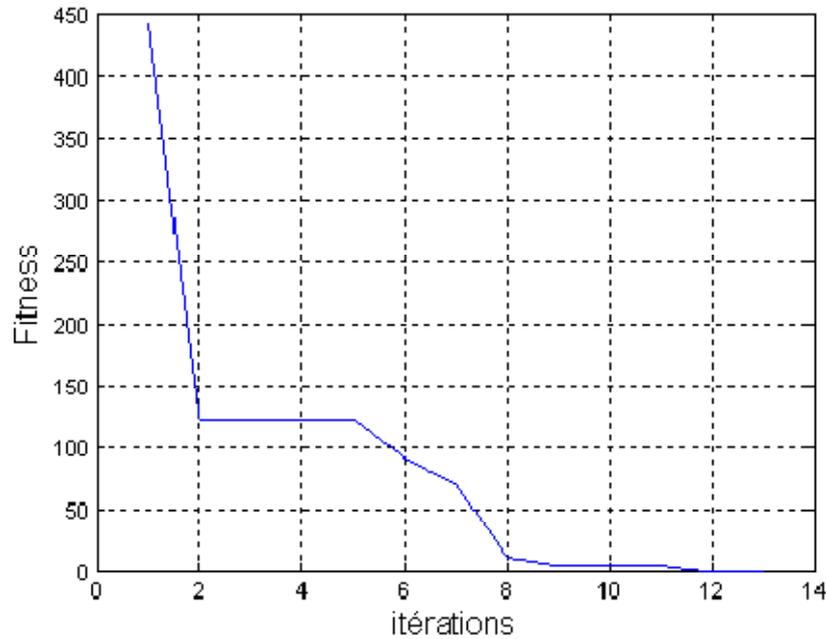


Fig. IV.27 : Evolution de la fonction fitness.

Ip = 3.7644 6.5706 7.9517 4.6415 8.2347 6.8339 8.9701 6.4399 8.2675
 8.6628 10.2394 8.9768 7.1766 9.5167 2.5173 3.3834 3.6909 4.5279
 2.9115 3.9358

dx = 0 0.5891 1.1544 1.6791 2.1427 2.7155 3.0975 3.5470 3.8062
 4.4302 4.8972 5.4486 6.0249 6.6228 7.0577 7.2873 7.6959 8.1589
 8.6595 9.1054

Discussion :

D'après les figures obtenues de cette troisième application, on voit que les diagrammes ont respecté les exigences imposées et que la fonction fitness converge dans les trois cas qu'on a exposé sur les figures (IV.22, IV.23, IV.24, IV.25, IV.26, IV.27). Donc on peut dire que l'OEP est un outil d'optimisation très efficace. De l'autre côté, il faut noter aussi que pour réaliser l'optimisation de l'OEP sur le terrain, il faut être d'abord en mesure de dépasser les contraintes de l'espace disposé à l'implantation des antennes (car on a les distances inter-sources qui varie), et en possession des équipements qui peuvent générer une multitude d'amplitudes de courant.

IV.3.4 Comparaison de l'OEP avec la méthode de Tchebychev :

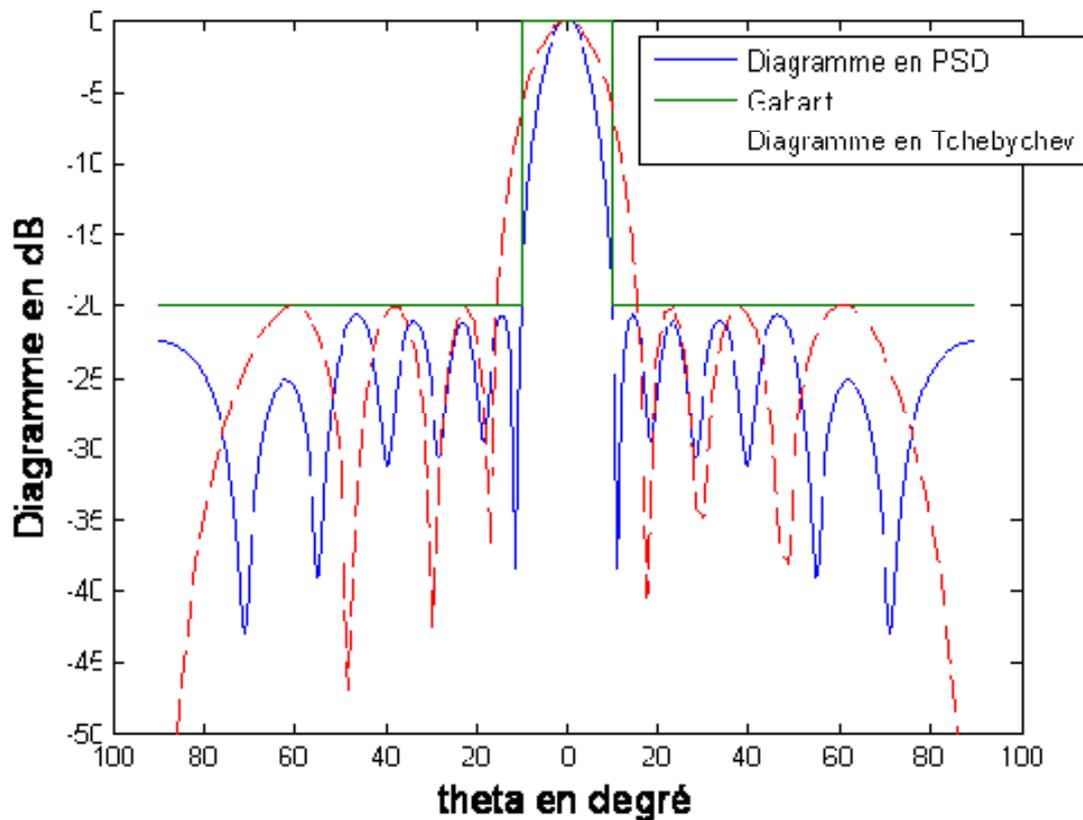


Fig. IV.28 : Diagrammes de rayonnements pour $N = 8$, optimisés par PSO et Tchebychev

Résultats :

a/ Résultats du diagramme OEP :

Les pondérations (I_p) :

7.8473 8.8642 11.9150 13.2356 13.6539 11.8974 8.3607 5.7422

Les distances (dx) :

0 0.7075 1.5026 2.2853 3.0694 3.8741 4.6769 5.4945

b/ Résultats du diagramme de Dolf Tchebychev :

Les pondérations (I_p) :

1.8614 2.8092 2.1196 3.2101 3.2101 2.8092 2.1196 1.8614

Les distances entre les éléments (dx) :

0 0.5000 1 1.5000 2.0000 2.5000 3.0000 3.5000

D'après cette figure (IV.28), on a confirmé qu'avec un nombre d'antennes assez réduit (relativement au nombre d'antennes de Localiser), le diagramme obtenu par l'OEP respecte mieux le gabarit que le diagramme obtenu par la méthode de Tchebychev.

Ce que nous voulons atteindre par l'ensemble des simulations, c'est qu'on peut optimiser (minimiser) le nombre d'antennes utilisé pour le Localiser de 12 élément à 8 éléments tout en assurant les mêmes caractéristiques du diagramme de rayonnement déjà existant, et ce, en utilisant la l'OEP.

Conclusion :

Dans l'ensemble, Cet algorithme permet de résoudre beaucoup de problèmes comme la satisfaction des contraintes d'un gabarit,...On peut aussi fixer certains paramètres telle que les positions des antennes et optimiser les autres.

On a remarqué que cette méthode n'est pas reproductible, et elle a présenté, dans les différentes simulations qu'on a effectué, le même gabarit avec des pondérations et distances inter-sources différentes.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons contribué au développement de la synthèse des réseaux d'antennes en se basant sur une métaheuristique du type OEP, pour optimiser le diagramme de rayonnement (l'ouverture du lobe principal, réductions des niveaux des lobes secondaires) d'un réseau d'antennes avec le minimum d'éléments possible en jouant sur des paramètres à savoir, la répartition spatiale des éléments ainsi que leurs alimentations, et cela suivant un gabarit désiré.

D'après les différentes simulations, on a constaté que cette approche présente des difficultés au niveau des paramètres de réglage de l'OEP (nombre de particules, l'inertie...).

Néanmoins cette approche donne de meilleurs résultats que les approches classique, ce qui confirme la robustesse de cette méthode.

Enfin, ce travail peut être un support très utile pour les étudiants qui veulent développer encore cette méthode et prendre en considération les déphasages des courants pour contrôler le balayage électronique de l'espace entourant le réseau d'antenne.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Optimisation d'un réseau d'antennes par l'algorithme génétique, Par : Rahni Lyes (Université Saad Dehleb, Département d'aéronautique, promotion : 2008 / 2009).
- [2] : Technique de l'ingénieur : Électricité et électronique, ELECTROMAGNETISME, HYPERFREQUENCES ET ANTENNES
- [3] : Cours d'antenne 4^{ème} année ingénieur aéronautique, par Mr : Menguellati S.
- [4] : 6^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, du 3 au 5 avril 2006 Rabat- Maroc, par : Debbat F. et Bendimerad F T. (Optimisation d'un réseau adaptatif d'antennes par l'algorithme génétique et le recuit simulé.
- [5] : thèse de doctorat : Synthèse du diagramme de rayonnement d'un réseau de sources. Par : Jean-Michel FLEURIAULT (Université de Rennes I (France), juin 1996).
- [6] : Manuel technique du Système d'atterrissage aux instruments, partie 3 (Localizer 421, système d'antenne dipôle à réflecteurs)
- [7] : 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 27-31, 2005 – TUNISIA, par : Debbat.F et Bendimerad.F.T (Les Algorithmes d'Optimisation Globale: Application Réseaux Intelligents d'Antennes)
- [8] : 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 25-29, 2007 – TUNISIA, par : GHAYOULA Ridha, GHARSALLAH Ali, FADLALLAH Najib, RAMMAL Mohamed, (Optimisation à la synthèse des diagrammes de rayonnement de réseau d'antennes linéaires par les réseaux de neurones)
- [9] : DESIGN OF A LINEAR ARRAY OF HALF WAVE PARALLEL DIPOLES USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION, par: M. Rattan (Department of Electronics and Communication Engineering Guru Nanak Dev Engineering College Ludhiana, Punjab, India)
- [10] : Optimisation par essaim de particules, par : Guillaume CALAS (école d'ingénieur en informatique, France)
- [11] : L'optimisation par essaim particulière (Tutoriel pour OEP 2003), par Maurice Clerc (France Télécom R&D).