

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique

Laboratoire Signal et Communications

Mémoire de Magister

pour l'obtention du diplôme de Magister en électronique

# Etude de la Couverture RADAR

Samia DJEGHLEF

Sous la direction de M. Daoud BERKANI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 16/06/2011

## Composition du jury :

Président	Mme. Mhania GUERTI,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Daoud BERKANI,	Professeur	ENP
Examineur	Mme. Latifa HAMAMI	Professeur	ENP
Examineur	M. Mohamed MEHENNI	Professeur	ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique

Laboratoire Signal et Communications

Mémoire de Magister

pour l'obtention du diplôme de Magister en électronique

# Etude de la Couverture RADAR

Samia DJEGHLEF

Sous la direction de M. Daoud BERKANI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 16/06/2011

## Composition du jury :

Président	Mme. Mhania GUERTI,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Daoud BERKANI,	Professeur	ENP
Examineur	Mme. Latifa HAMAMI	Professeur	ENP
Examineur	M. Mohamed MEHENNI	Professeur	ENP

ENP 2011

## **DEDICACE**

A ma Mère, mon Père et ma famille.  
A Sid Ali et Adem.  
A Zahia et Abdou.  
A mon amie Radia.  
A toi Aicha.

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage de surmonter les moments difficiles et la volonté de terminer ce travail.

Je tiens à remercier beaucoup Mr Berkani qui était très compréhensif.

Je remercie chaleureusement ma très très Chère amie Aicha de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir toujours soutenu.

Je souhaite remercier Mme M. GUERTI, Mme L. HAMAMI et Mr M.MEHENNI pour avoir accepté de juger mon travail.

## ملخص:

استخدام الرادار في مراقبة الحركة الجوية يمكن من زيادة قدرة الحركة الجوية. تحديد التغطية الرادارية ضروري من جهة لتصنيف المجال الجوي و من جهة أخرى لنشر وسائل أخرى لتغطية مناطق الصمت. و كان الهدف من عملنا تحديد تغطية رادارات المؤسسة الوطنية للملاحة الجوية، و هذا مع الأخذ بعين الاعتبار تضاريس الجزائر و عرض النتائج على خرائط رقمية. في نهاية هذا العمل اقترحنا بعض الحلول للقضاء على مناطق الصمت. حاجتنا إلى استخدام وسيلة قوية للعلاج أدت بنا إلى استخدام نظم المعلومات الجغرافية. **الكلمات الدالة:** تغطية الرادار، نظم المعلومات الجغرافية، نموذج التضاريس الرقمية (ديتيام)، Arcview، تقنية متعدد الإرساليات، طبوغرافيا.

## Abstract:

The use of radar in air traffic control can increase the traffic capacity. Determination of radar coverage is essential firstly to classify airspace, secondly to deploy other means of detection in silent zones.

The purpose of our study is to determine the coverage of all radars set by the national establishment of air navigation (ENNA), taking into account the topography of Algeria and display the results on digital maps at the end of this work we propose solutions to cover silent areas.

The need to use a powerful means of treatment has led us to use geographic information systems (GIS).

**Key words:** radar coverage, geographical information systems (GIS), digital elevation model (DEM), Arcview, topography, multilateration (MLT).

## Résumé:

L'utilisation de radar dans le domaine de contrôle aérien permet d'augmenter la capacité du trafic aérien. La détermination de la couverture radar est indispensable d'une part pour classer l'espace aérien, d'autre part pour déployer d'autres moyens de détection dans les zones de silence.

L'objectif de notre travail est de déterminer la couverture des radars de l'établissement national de la navigation aérienne (ENNA) en tenant compte de la topographie de l'Algérie et d'afficher les résultats sur des cartes numériques, à la fin de ce travail nous proposons des solutions pour couvrir les zones de silence.

Le besoin d'utiliser un moyen de traitement puissant nous a conduit à utiliser les systèmes d'informations géographiques.

**Mots clés:** couverture radar, systèmes d'informations géographiques (SIG), modèle numérique de terrain (MNT), ArcView, topographie, multilatération (MLT).

## TABLE DES MATIERES

### Contenu

INTRODUCTION .....	8
Chapitre 1 .....	12
1.1. Introduction: .....	12
1.2. Historique: .....	12
1.3. Relation de base .....	13
1.4. Le principe du radar: .....	14
1.5. L'équation du radar : .....	19
1.6. Le bruit dans le radar : .....	21
1.7. Types de radar: .....	24
1.7.1. Le Radar Primaire (PSR ou Primary Surveillance Radar) : .....	24
1.7.2. Le Radar Secondaire (SSR ou Secondary Surveillance Radar) : .....	24
1.8. Différents Radars utilisés au contrôle du trafic aérien: .....	27
1.8.1. Radar en route : .....	27
1.8.2. Radar de surveillance terminal (TSR) : .....	27
1.8.3. Radar d'approche de précision (PAR) : .....	27
1.8.4. Radar de surveillance des mouvements de surface (SMR) : .....	28
1.8.5. Radar météorologique : .....	28
1.9. Les plages de fréquences radar: .....	28
1.10. Conclusion: .....	29
Chapitre 2 : La couverture RADAR .....	32
2.1. Introduction : .....	32
2.2. Les antennes : .....	32
2.2.1. Introduction : .....	32
2.2.1. Rayonnement de l'antenne Radar Secondaire : .....	33
2.2.2. Les fausses cibles. ....	33
2.3. Propagation de l'onde radar: .....	34
2.4. Détermination de la couverture radar: .....	36
2.4.1. Introduction: .....	36
2.4.2. Calcul de la limite inférieure de rayonnement: .....	37
2.4.3. Calcul de la limite inférieure de rayonnement en présence d'obstacle: .....	39
2.4.4. La détection d'une cible: .....	40
2.5. Conclusion : .....	41
Chapitre 3 Les systèmes d'informations géographiques .....	43
3.1. Introduction: .....	43
3.2. Fonctionnalités d'un SIG : .....	43
3.2.1. L'Abstraction: .....	43
3.2.2. L'Acquisition: .....	44
3.2.3. L'Archivage : .....	47

3.2.4. L’Affichage:.....	47
3.2.5. L’Analyse:.....	48
3.3. Les environnements de développement : .....	49
3.3.1. Introduction :.....	49
3.3.2. Classification de logiciels SIG :.....	49
3.4. Choix de logiciel : .....	50
3.5. Présentation générale du logiciel ArcView : .....	50
3.6. Conclusion : .....	51
Chapitre 4 : Application .....	54
4.1. Introduction: .....	54
4.2. Présentation de projet TRAFCA:.....	54
4.3. Sectorisation de l’espace aérien: .....	56
4.4. Établissement de la couverture RADAR:.....	58
4.5. Les relèvements sur sites: .....	72
4.6. Interprétations des résultats et comparaison avec les relèvements: .....	73
4.7. Conclusion .....	73
CONCLUSION GENERALE .....	75
BIBLIOGRAPHIE .....	77

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Le schéma le plus simple d'un radar.....	15
Figure 1.2 : Format de signal à impulsion.....	16
Figure 1.3 : Format de signal à ondes continues.....	17
Figure 1.4 : Schéma fonctionnel simplifié du radar.....	18
Figure 1.5 : Elaboration de l'équation du radar.....	20
Figure 1.6 : La puissance reçue en fonction de la distance.....	21
Figure 1.7 : Les différents bruits dans le radar.....	22
Figure 1.8 : Le gain d'un récepteur.....	23
Figure 1.9 : L'afficheur de transpondeur.....	25
Figure 1.10 : Formats des signaux d'interrogations.....	25
Figure 1.11 : Fonctionnement du radar secondaire.....	26
Figure 1.12 : Les domaines d'utilisation du radar.....	27
Figure 2.1 Diverses représentations d'une trajectoire avec 3 valeurs particulières du gradient.....	36
Figure 2.2 : Détermination de la hauteur d'une cible.....	37
Figure 2.3 : Détermination de la hauteur d'une cible.....	38
Figure 2.4 : Le rayonnement du radar en présence de reliefs.....	39
Figure 2.5 : Position de la cible par rapport à la limite inférieure de rayonnement.....	41
Figure 3.1 : Exemple d'un vecteur.....	45
Figure 3.2 : Exemple d'image satellitaire.....	46
Figure 3.3 : Fenêtre de présentation d'un projet ArcView.....	51
Figure 4.1 : Schéma simplifié des installations radar de projet TRAFCA.....	56
Figure 4.2 : Sectorisation de la partie nord de la FIR Alger.....	57
Figure 4.3 : Les étapes de détermination de la couverture radar.....	58
Figure 4.4 : Format du modèle numérique de terrain (MNT).....	59
Figure 4.5 : Table de données de secteur 2 autour de radar d'EL Oued (elosec2).....	60
Figure 4.6 : Table de données en coordonnées polaires d'elosec2.....	61
Figure 4.7 : Table de données en coordonnées polaires rangée d'ornsec2.....	62
Figure 4.8 : Table de donnée en coordonnées polaires rangées et les Hvie correspondants.....	63
Figure 4.9 : La description des zones de couverture radar à 11 000ft.....	64
Figure 4.10 : La description des zones de couverture radar à 16000ft.....	65
Figure 4.11 : La description des zones de couverture radar à 20 000ft.....	66
Figure 4.12 : La description des zones de couverture radar à 21 000ft.....	67
Figure 4.13 : La description des zones de couverture radar à 22 000ft.....	68
Figure 4.14 : La description des zones de couverture radar à 27 000ft.....	69
Figure 4.15 : La description des zones de couverture radar à 30 000ft.....	70
Figure 4.16 : La description des zones de couverture radar à 35 000ft.....	71

## INTRODUCTION

Les premières applications de la radioélectricité furent les télécommunications puis la radionavigation, mais dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle des précurseurs envisagèrent la possibilité de détecter la présence d'objets métalliques par l'utilisation d'ondes électromagnétiques.

Cette nécessité de détecter des objets sans la participation de l'objet lui-même s'est fait sentir pour les besoins de la navigation et de l'anticollision, notamment dans le domaine des transports maritimes, mais c'est le besoin militaire de la défense maritime qui fut le principal moteur de cette technique nouvelle à partir des années trente.

Le mot radar lui-même, qui est aujourd'hui universellement adopté pour désigner un matériel répondant à ces exigences, est un nom de code officiellement adopté par la marine nationale des États-Unis en novembre 1940, abréviation de l'expression "Radio Détection And Ranging", mais les origines du radar lui sont bien antérieures.

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes que se soit militaire ou civile tel que la météorologie pour repérer et définir les zones de tempêtes et pour suivre le matériel aérien servant à déterminer les vents en altitude, et autres phénomènes météorologiques, pour la surveillance du trafic routier, en astronautique, en transport maritime, en aéronautique pour le contrôle du trafic aérien qui est notre domaine d'intérêt dans cette étude.

Deux types de systèmes radar peuvent être utilisés : le radar primaire de surveillance (PSR) et le radar secondaire de surveillance (SSR). Le PSR détermine la position (distance et azimuth) des cibles (aéronefs et météo) en mesurant et en affichant les signaux radio réfléchis par ces cibles. Il ne repose pas sur l'information transmise par un aéronef. Le SSR, lui, se sert de la mesure de l'intervalle entre le moment de l'interrogation et celui de la réponse donnée par un transpondeur de bord pour déterminer la distance d'un aéronef. L'orientation instantanée de l'antenne détermine l'azimut de la cible.

Le SSR ne peut donner la position d'un aéronef que si cet aéronef est équipé d'un transpondeur de bord et que ce transpondeur est allumé. Il ne peut pas non plus localiser les phénomènes météorologiques. Toutefois, il offre des avantages opérationnels appréciables au contrôleur de la circulation aérienne (ATC), comme une longue portée, l'identification fiable et l'altitude de l'aéronef lorsque cet aéronef possède un transpondeur codeur d'altitude.

Le contrôleur dispose de bandes en papiers "strippes" représentant les avions au départ et à l'arrivée. Chaque appareil doit donner des estimées pour certains points et s'annoncer régulièrement quand il passe au-dessus des balises de radionavigation. Avec ces informations, le personnel au sol assure la séparation sous réserve que tous les intervenants respectent scrupuleusement les instructions et les consignes de navigation.

L'utilisation du radar permet au contrôleur de la circulation aérienne (ATC) de réduire l'espacement entre les aéronefs et d'accroître ainsi l'utilisation de l'espace aérien. Le pilote peut transmettre la position et l'altitude de l'avion au contrôleur de la circulation aérienne (ATC) au moyen du système de communication VHF. Bien que cette méthode soit efficace, ce n'est pas une solution optimale dans des secteurs du trafic dense où le contrôleur doit être constamment au courant de la position exacte de tous les avions et à tout moment dans cet espace aérien. Pour cette raison, le centre de contrôle aérien emploie un système radar de

surveillance au sol pour visualiser automatiquement les positions de tous les aéronefs dans la zone de contrôle sans encombrer les canaux de communication radio. Cette information est constamment affichée sur l'écran radar, le contrôleur peut prendre des décisions au moment opportun pour transférer les avions au centre d'approche ou au centre de contrôle régional, diriger les aéronefs en leur donnant des caps pour éviter des collisions, maintenir une séparation vertical entre les aéronefs, localiser et diriger les aéronefs perdus.

L'augmentation du trafic aérien ces dernières années dans notre espace aérien, due à la position géographique stratégique de notre pays, a fait de l'Algérie un carrefour des voies aériennes. Pour faire face à cette évolution de trafic, l'établissement national de la navigation aérienne (ENNA) qui est l'organisme responsable de la gestion de l'espace aérien algérien, a prévu le besoin d'implanter des radars sur notre territoire national afin d'augmenter la capacité de l'espace aérien et de satisfaire tous les besoins, exprimés ou non, de tous les usagers de l'espace aérien national (compagnies aériennes, pilotes et personnels), conformément aux impératifs de sécurité et de fluidité de trafic.

Nous étudions dans ce mémoire un paramètre très important dans l'implantation des radars, qui est **la couverture radar**, définie par l'ensemble de points autour de radar où il y a présence de signal radar afin de déterminer les zones couvertes et les zones non couvertes par le radar.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer la couverture radar sur notre espace aérien et de la représenter en 2 dimensions (2D), en se basant sur les cinq radars secondaires de l'établissement nationale de la navigation aérienne "ENNA" définis dans le projet TRAFCA (traitement automatique des fonctions du contrôle aérien) en tenant compte des reliefs existants, qui bloquent une partie du rayonnement.

Le besoin d'un outil de traitement informatique performant permettant d'abstraire, acquérir, archiver, afficher et analyser, nous a conduit à utiliser les systèmes d'informations géographiques (SIG) vue les capacités de traitement qu'offre à son utilisateur en un temps très court, parfois en temps réel. Nous visualiserons les résultats de cette étude de la couverture radar sur le plan horizontal pour une altitude donnée au dessus de niveau de la mer, ce qui nous permet de localiser les zones de non couverture. Nous proposons à la fin de ce travail des solutions performantes, plus fiables, et moins coûteuses pour avoir un plus grand espace couvert.

Après une introduction générale, présentons ce mémoire à travers cinq chapitres : Dans Le premier chapitre nous abordons des notions de base sur le radar, nous commençons par un historique de cette invention, ensuite le principe de son fonctionnement et les types du radar, comme nous nous intéressons au radar destinés au contrôle aérien nous présentons les différents radars utilisés dans ce domaine sensible nécessitant une grande vigilance que se soit de coté humain que matériel, à la fin de ce chapitre nous récapitulons dans un tableau les fréquences allouées aux radars.

Le deuxième chapitre illustre la propagation de l'onde radar et nous passons par la suite à vérifier la présence de signal radar en un point quelconque de l'espace afin de déterminer la couverture radar.

Vue la nécessité d'un outil de traitement performant permettant de traiter un nombre de points très élevé, nous avons utilisé les systèmes d'informations géographiques qui sont présentés dans Le troisième chapitre, à la fin de ce chapitre nous présentons le logiciel

Arcview, que nous avons choisi pour faire nos simulations.

Le quatrième chapitre est consacré à établir la couverture des cinq radars secondaires de l'établissement nationale de la navigation aérienne ENNA, nous discuterons des résultats obtenus, en faisant des comparaisons avec les relèvements sur site.

Nous terminons par une conclusion, et nous proposons d'autres moyens plus fiables moins coûteux, plus facile à installer et à entretenir qui pourront être utilisés pour étendre la couverture radar et assurer un plus grand espace contrôlé.

# Chapitre 1

# Chapitre 1 Le RADAR

## 1.1. Introduction:

Le radar, véritable "sixième sens" de l'homme moderne, a été développé pour "détecter" la présence d'un objet sans sa participation. Le mot R.A.D.A.R. est en fait une abréviation américaine pour désigner ce type d'appareil dont le nom réel est "Radio Detection And Ranging" que l'on peut traduire par "détection et localisation par ondes radio" ou plus simplement par "radiorepérage". Depuis, le mot radar est entré dans le langage courant perdant alors son écriture en majuscule. (BLANCHARD-2004)

Les systèmes radars diffèrent en tailles et en performances, quelques systèmes radar sont employés pour le contrôle aérien aux aéroports, d'autres sont employés pour la surveillance à grande portée et les systèmes de pré alerte. Le système radar est le cœur du système de guidage des missiles. Il existe de petits systèmes radar portatifs qui peuvent être gérés par une personne aussi bien que des systèmes qui occupent plusieurs grandes salles.

## 1.2. Historique:

Ni une seule nation ni une seule personne ne peut prétendre à l'exclusivité de l'invention du radar, le "Radar" est le résultat de plusieurs inventions et développements. Nous citons quelques dates qui ont été marquées par la découverte d'importantes connaissances de base et d'inventions: (BLANCHARD2004) (BENTEJAC2007) (BROOKNER1977) (VIOLET1953) (BARTON2004)

**1864** : le physicien Écossais **James Clerk Maxwell** développe sa théorie d'électromagnétisme (Description des ondes électromagnétiques et leur propagation)

**1886** : le physicien Allemand **Heinrich Rudolf Hertz** découvre l'onde électromagnétique et prouve la théorie de Maxwell en démontrant l'existence physique des ondes électromagnétiques et leurs identités avec les ondes lumineuses.

**1904** : l'ingénieur allemand en hyper fréquence **Christian Hülsmeier** invente le "Télémbiloscope" pour la surveillance de trafic maritime. Il calcule la distance entre la source et l'objet métallique et cela en mesurant le temps d'aller et retour de l'onde électromagnétique. Cela est le premier test radar pratique. Hülsmeier demande de breveter son invention en Allemagne et en Angleterre.

**1917** : l'ingénieur Français **Lucien Lévy** invente le récepteur super-hétérodyne. Il a utilisé comme première dénomination "Intermediate Frequency" et évoque la possibilité de double hétérodyne.

**1921** : l'invention de Magnétron comme un efficace tube de transmission par le physicien American **Albert Wallace Hull**.

**1922** : l'ingénieur en électricité américain **Albert H. Taylor** et **Leo C. Young** de "Naval Research Laboratory" observent l'apparition de battement sur une liaison radio, coïncidant avec le passage des bateaux.

**1924** : **Appleton** et **Barnett** prouvent l'existence de l'ionosphère en utilisant la réflexion

d'ondes entretenues. Ils reconnurent aussi que le phénomène était plus compliqué qu'on ne le pensait jusqu'à alors et on imagine d'employer des impulsions brèves comme moyen d'investigation et détermination d'altitude des diverses couches réfléchissantes.

**1930** : **Lawrence A. Hyland** de "Naval Research Laboratory", détecte accidentellement et pour la première fois, le passage d'un avion dans un faisceau d'ondes radio de 9m de longueur d'onde.

**1931** : Premier bateau à être équipé avec radar.

**1936** : le développement de Klystron par les deux techniciens **George F. Metcalf** et **William C. Hahn**, de "General Electric" qui sera un composant important dans le système Radar, utilisé comme amplificateur ou tube oscillateur.

**1940** : Différents radars sont développés aux états unis, Russie, Allemagne, France, Italie, Hollande et au Japon.

**1946** : unécho radar a été reçu de la lune. C'était la première liaison spatiale réalisée dans le monde.

### 1.3. Relation de base:

Les trois paramètres de la propagation d'une vibration périodique sont reliés de la façon suivante :(BENTEJAC2007)

$$\lambda = c T = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Où

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$\lambda$  : longueur d'onde, en mètres.

C : vitesse de propagation, en mètres par seconde.

T : période de la vibration, en seconde.

F : fréquence de vibration en cycle par seconde.

Pour les ondes électromagnétiques,  $c = 300\,000\text{ km/s}$  ou  $3 \cdot 10^8\text{ ms}$  et  $f$  en Hertz. Dans le cas du radar,  $f$  est le plus souvent exprimé en mégahertz, MHz et la formule la plus commode est :

$$\lambda(\text{m}) = \frac{300}{f(\text{MHz})} \quad (3)$$

À noter également que  $10^3\text{ MHz} = 10^9\text{ Hz} = 1\text{ gigahertz, GHz}$ , utilisé en ondes millimétriques.

## 1.4. Le principe du radar:

Un radar est un instrument d'alerte (détection) et de mesure (localisation), dans cette deuxième fonction, deux caractéristiques sont essentielles:

- Précision, incertitude sur la valeur exacte de chaque paramètre de localisation.
- Pouvoir séparateur, ou résolution: possibilité de distinguer et de localiser séparément plusieurs cible. A cet effet, on émet une onde électromagnétique dans une direction ou dans une zone déterminée, là où l'objet intéressant est supposée se trouver; si c'est le cas, une partie de l'énergie qui rencontre l'objet est rayonnée par celui-ci dans toutes les directions et une partie de ce rayonnement reviens vers l'antenne du radar, qui alimente alors un récepteur: le signal ainsi capté est appelé écho. Cet écho va donc signaler la présence de l'objet qui constitue la cible. (WOLFF2011)

Tout équipement radar comporte donc, d'après la définition précédente, un émetteur destiné à produire le rayonnement hertzien initial et un récepteur destiné à détecter le rayonnement réémis par l'obstacle. (VIOLET1953)

Si D est la distance entre l'antenne du radar et la cible, le temps écoulé entre le départ de l'onde et le retour de l'écho est donc : (THOUREL1965)

$$t_0 = \frac{2D}{c} \quad (4)$$

C: vitesse de la lumière.

En mesurant  $t_0$ , on peut déterminer D.

Une mesure de distance, en radar, revient donc toujours à une mesure de temps.

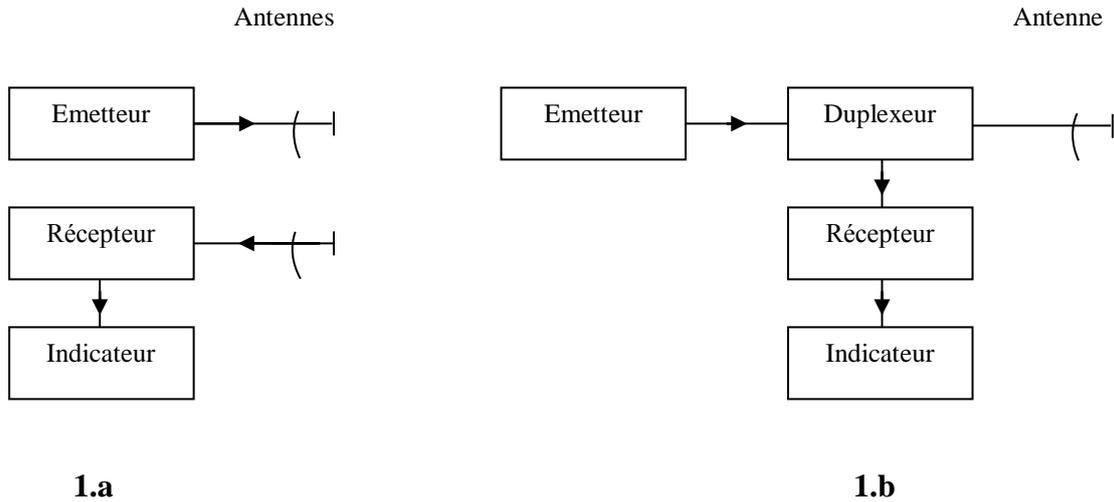
La localisation de la cible en direction est assurée à partir de l'antenne: si celle-ci rayonne un faisceau très fin, d'ouverture angulaire  $\theta_0$ , il ne sera reçu que si l'antenne est dirigée vers la cible. Pratiquement  $\theta_0$  est l'ouverture à -3db du diagramme de rayonnement de l'antenne c.à.d; Si L est la largeur de celle-ci dans le plan considéré: (THOUREL1965)

$$\theta_0 = \frac{70\lambda}{L} \quad (5)$$

$\lambda$ : Longueur d'onde en mètre si L est en mètre et  $\theta_0$  en degré.

La direction de rayonnement de l'antenne indique la direction de la cible avec une certaine précision qui dépend de  $\theta_0$ .

Le schéma le plus simple d'un radar est donc celui de la figure (1.1 a) mais ce montage présente l'inconvénient de nécessiter deux antennes. D'autre part si  $\theta_0$  est très faible aussi bien pour l'antenne d'émission que pour l'antenne de réception ceci afin de disposer du maximum d'énergie rayonnée dans la direction de la cible, il peut apparaître des difficultés de pointage simultané des deux antennes sur celle-ci quand elle évolue.



**Figure 1.1 : Le schéma le plus simple d'un radar.**

Pour éviter ces inconvénients, nous pouvons utiliser une antenne unique figure (1.1 b) qui fonctionne à la fois en émission et en réception: un appareil dit duplexeur ou alternat permet de connecter cette antenne sur l'émetteur ou sur le récepteur suivant les besoins.

Après que le récepteur ait amené les échos à un niveau convenable, ceux-ci sont envoyés dans un indicateur qui présente les informations du radar.

Du point de vue de leurs fonctionnements les radars peuvent, en gros, se classer en deux catégories:

- les radars à impulsions (pulse radar).
- les radars à ondes continues (CW radars).

Les premiers sont les plus répandus, et de beaucoup ; ils permettent de détecter l'existence d'un objectif et de le localiser souvent avec une grande précision. Les seconds utilisent l'effet Doppler ; ils détectent aussi l'existence d'objectifs mais sans pouvoir les localiser ; par contre, ils indiquent naturellement la vitesse de déplacement radiale de l'objectif (cas des radars routiers). Aussi il existe des ensembles radar qui associent deux procédés, par exemple, pour éliminer les échos fixes. (BENTEJAC2007)

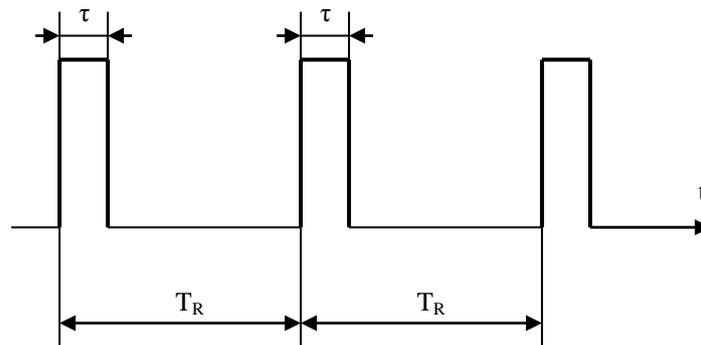
Les radars à impulsions sont équipés d'un émetteur envoyant des impulsions brèves (quelques nano-secondes à quelques centièmes de secondes) séparées par des durées variables suivant les cas: la figure (1.2) représente les trains d'ondes émis,  $\tau$  correspond à la durée des impulsions et  $T_R$  à la période de répétition de ces impulsions. On peut également définir la fréquence de répétition  $f_R$  par la relation:

$$f_R = \frac{1}{T_R} \quad (6)$$

Le plus souvent,  $f_R$  se situe entre quelque dizaine de Hz à quelque dizaine de KHz, tandis que la fréquence des ondes se situe entre quelque centaine de Mhz à quelques dizaines de Ghz.

$T_R$  n'est pas nécessairement constant et il existe des radars dans lesquels les impulsions sont modulées en durée ou en position. De même la fréquence de l'onde  $f_c$  peut

varier d'une impulsion à la suivante ou être modulée à l'intérieur d'une impulsion. Sauf indication contraire cependant, nous considérons le cas simple où  $f_c$ ,  $\tau$  et  $T_R$  sont constantes.



**Figure 1.2 : Format de signal à impulsion**

Dans un radar à impulsions, il faut considérer la *puissance crête*  $P_c$  durant l'impulsion, qui peut atteindre plusieurs dizaines de mégawatts et la *puissance moyenne* qui est évidemment:

$$P_m = P_c \frac{\tau}{T_R} \quad (7)$$

Le rapport  $\tau/T_R$  est appelé le *facteur de charge* (dut cycle) de l'émetteur: il est souvent égal à 1/10000.

L'énergie dans l'impulsion, dont dépend la portée du radar est:

$$E = P_c * \tau \quad (8)$$

E en joules,  $P_c$  en watts,  $\tau$  en secondes.

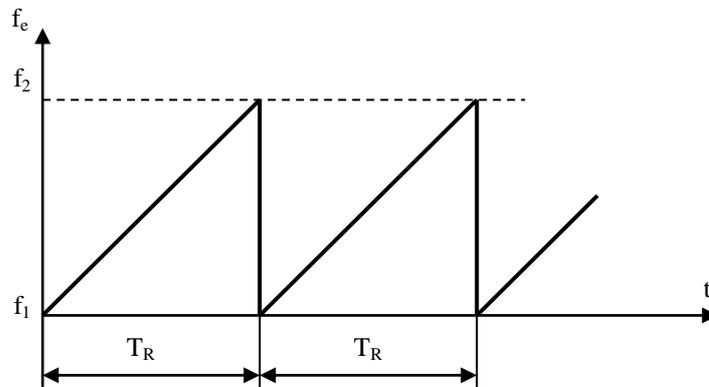
Le radar à ondes continues peut être monochromatique, mais la mesure de la distance de la cible nécessite une modulation qui est le plus souvent une modulation de fréquence: le cas le plus simple est celui d'une modulation en dent de scie figure (1.3) ou (accent) la fréquence  $f_c$  varie linéairement de  $f_1$  à  $f_2$ , soit à un taux :

$$\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{T_R} \quad (\text{Hz/s}) \quad (9)$$

Pendant le temps  $t_0$  aller et retour de l'onde, la fonction émise a varié de:

$$\Delta F = \Delta f * t_0 = \frac{f_2 - f_1}{T_R} * \frac{2D}{c} \quad (\text{s}) \quad (10)$$

Et la mesure de  $\Delta F$  est une mesure de D.



**Figure 1.3 : Format de signal à ondes continues.**

Nous pouvons maintenant préciser un peu mieux la structure d'un radar, dont le schéma fonctionnel simplifié est donnée par la figure (1.4), dans le cas d'une antenne unique. L'onde émise est modulée en impulsion, en fréquence (ou en phase) ou quelque fois en amplitude; l'émetteur comportera donc un oscillateur à la fréquence  $f_c$  suivi éventuellement d'un amplificateur hyperfréquence, il comportera également un modulateur qui sera commandé par un ensemble de synchronisation à la fréquence  $f_R$ , lui-même déclenché par une horloge.

Le duplexeur est différent suivant qu'il s'agit d'un radar à impulsion ou d'un radar à ondes continues. Dans le premier cas, on se sert souvent de tube à gaz raréfié qui s'ionise au moment des impulsion d'émission, envoyant ainsi l'énergie dans l'antenne et qui, étant non ionisé entre les impulsions, dirige les échos délivrés par l'antenne vers le récepteur dans le cas d'un radar à onde continue, le duplexeur est un circulateur à ferrite(mais on est assez souvent conduit à se servir de deux antennes séparées).

Le récepteur commence par un amplificateur hyperfréquence à haute sensibilité (amplificateur à transistor ou à diode) suivi d'un mélangeur qui, alimenté par ailleurs par un oscillateur local (O.L) délivrant la fréquence  $f_1$ , fournit une fréquence:

$$f_m = f_1 - f_e \quad (\text{Hz}) \quad (11)$$

Qui est la fréquence intermédiaire(ou F.I) du radar. Cette F.I est souvent d'une trentaine de Mhz.

À noter que si la cible est mobile (avion par exemple), la fréquence  $f_c$  est affectée d'effet Doppler, soit une fréquence doppler  $f_d$  et la relation précédente devient:

$$f_m = f_1 - (f_e + f_d) \quad (12)$$

$F_d$  est toujours faible devant  $f_m$ .

L'amplificateur  $F_1$  fixe la sélectivité du récepteur tandis que l'amplificateur hyperfréquence d'entrée fixe sa *sensibilité*.

Une détection et une amplification vidéo donnent le signal utile qui sera envoyé dans l'indicateur, mais l'emploi de ce signal nécessitera le plus souvent un traitement. Ce traitement peut commencer au stade I, mais il faudra fréquemment des circuits spéciaux et même des microprocesseurs. Quant à l'indicateur lui-même il peut varier en structure depuis le simple tube cathodique jusqu'à un ordinateur plus au moins sophistiqué.

Les dispositifs de traitement du signal et l'indicateur reçoivent par ailleurs les signaux de l'horloge de synchronisation générale ainsi que la recopie des mouvements de l'antenne (localisation de la cible en direction) : ils élaborent éventuellement des signaux commandant ces mouvements (par exemple dans les radars de poursuite automatique). Enfin, dans le cas de radars équipés d'un auto oscillateur (radars non cohérents) il est nécessaire d'asservir la fréquence de l'oscillateur local des récepteurs par un contrôle automatique de fréquence: c'est le cas de la figure (1.4). On peut également se servir des radars dans les quels la fréquence d'émission et la fréquence de l'O.L sont élaborées à partir d'une fréquence commune, le plus souvent très stable (radar cohérents). On utilise également des radars pseudo cohérents dans lesquels l'O.L est verrouillé en phase sur la fréquence émise, ou inversement.

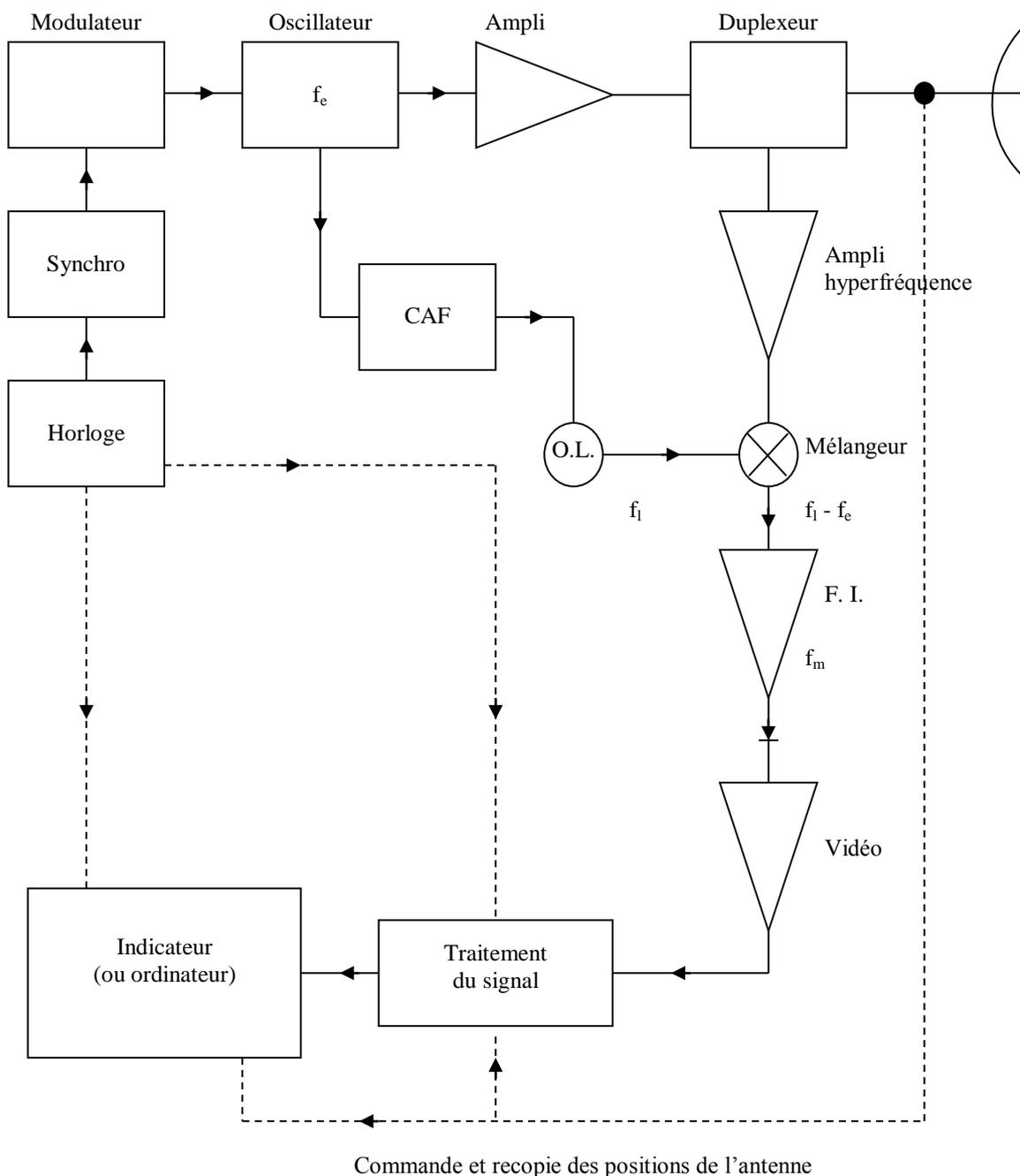


Figure 1.4 : Schéma fonctionnel simplifié du radar.

## 1.5. L'équation du radar :

L'équation du radar traduit l'influence de phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi (écho). L'équation radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar.

On supposera que les ondes électromagnétiques se propagent dans des conditions idéales, sans subir une quelconque perturbation.

On considère un radar monostatique doté d'une antenne directive utilisée en émission et en réception de gain max  $G$  et de surface équivalente  $A_e$  avec :(THOUREL1965)

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (13)$$

Lorsque l'énergie haute fréquence est rayonnée à partir d'une antenne isotrope, elle se propage de façon uniforme dans toutes les directions. Les zones égales densité de puissance forment donc des surfaces sphériques concentriques autour de l'antenne. Lorsque le rayon de la sphère augmente, une même quantité d'énergie est diffusée sur une plus grande surface sphérique. Cela revient à dire que la densité de puissance, dans une direction donnée, diminue lorsque la distance de l'émetteur augmente.

La formule suivante permet de calculer la densité de puissance rayonnée par l'antenne à la distance  $D$  du radar pour une puissance crête  $P_c$  émise :

$$p_i = G \frac{P_c}{4\pi D^2} \quad (\text{w/m}^2) \quad (14)$$

La détection d'une cible ne dépend pas uniquement de la densité de puissance à sa position. Elle dépend également de la partie de l'énergie réfléchie par la cible qui est rayonnée vers l'antenne du radar. Afin de déterminer la valeur de cette puissance réfléchie utile, il est nécessaire de définir une surface équivalente radar le cible SER noté  $\sigma$ . Cette valeur difficile à appréhender dépend de plusieurs paramètres. Il est relativement logique de considérer que la surface éclairé par le signal est grande, plus la puissance réfléchie est importante. Au-delà des considérations de taille, la capacité de d'un objet à réfléchir les ondes dépend de sa forme, de la composition de sa surface et de la natures des matériaux utilisés.

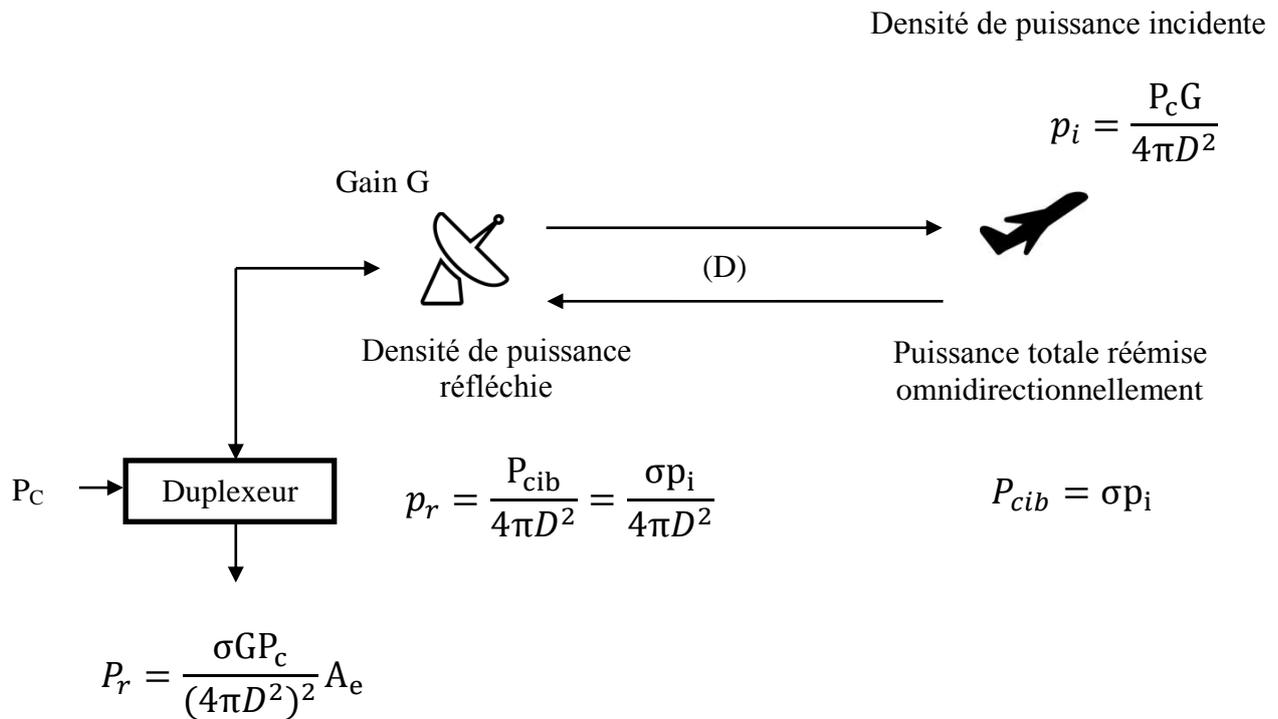
La puissance totale reçue par la cible est :

$$P_{cib} = p_i \cdot \sigma = \frac{P_c}{4\pi D^2} G \sigma \quad (\text{w}) \quad (15)$$

La cible se comporte comme un émetteur qui réémet omnidirectionnellement (gain=1) la puissance  $P_{cib}$ .

La densité de puissance atteignant le radar s'écrit donc :

$$p_r = \frac{P_{cib}}{4\pi D^2} = \frac{\sigma G P_c}{(4\pi D^2)^2} \quad (\text{w/ m}^2) \quad (16)$$



**Figure 1.5 : Elaboration de l'équation du radar.**

La puissance totale captée par le radar qui dépend de la surface équivalente  $A_e$  de l'antenne du radar est :

$$P_r = p_r \cdot A_e = \left( \frac{\sigma G P_c}{(4\pi D^2)^2} \right) \left( \frac{G \lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 D^4} \text{(w)} \quad (17)$$

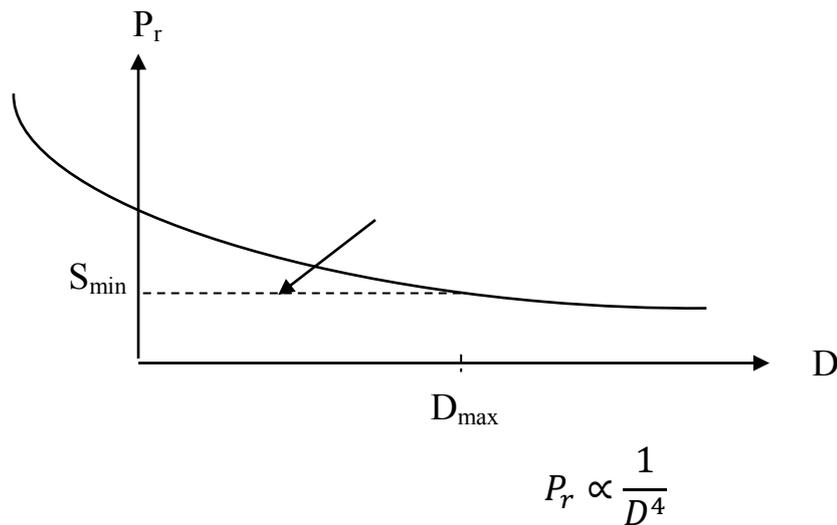
D'où on tire la distance:

$$D = \left( \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_r} \right)^{\frac{1}{4}} \text{(m)} \quad (18)$$

Soit  $P_{r \min}$  la puissance minimum du signal autorisant sa détection par le radar. Tout signal de puissance inférieure ne peut être exploité puisqu'il est noyé dans le bruit du récepteur. Ce signal de puissance minimum  $S_{\min} = P_{\min}$  est donc celui qui permet au radar d'atteindre sa portée maximum de détection  $D_{\max}$ .

On aura :

$$D_{\max} = \left( \frac{P_c G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}} \text{(m)} \quad (19)$$



**Figure 1.6 : La puissance reçue en fonction de la distance.**

### 1.6. Le bruit dans le radar :

Nous appelons bruit tout signal électrique qui perturbe le signal que l'on désire traiter, les sources de bruit qui altèrent le signal sont très diverses, il s'agit ;

- du bruit des récepteurs,
- du bruit de ligne de transmission,
- du bruit du sol,
- du bruit du ciel,

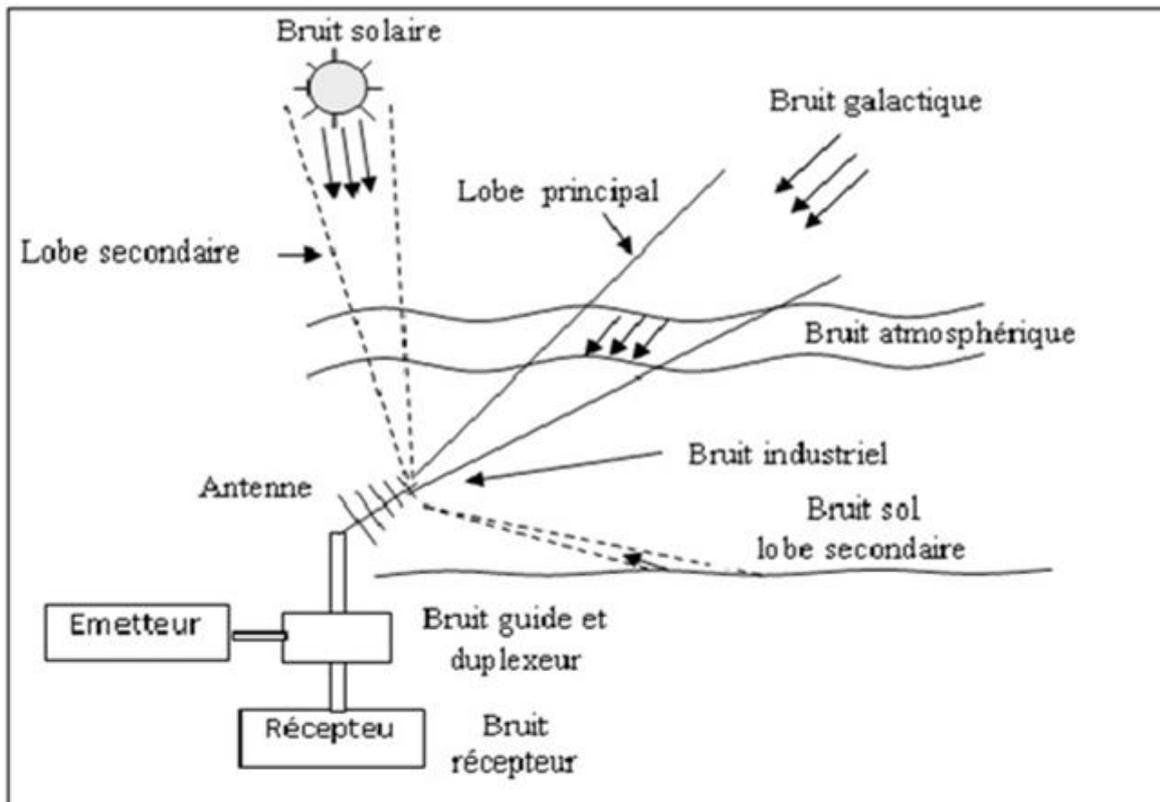
Et leur importance relative dépend du rôle joué par le système considéré ; par exemple, dans le cas d'un système de communication par satellite, le bruit de ciel capté par l'antenne n'est pas négligeable.

Dans un système radar, le bruit provenant des es éléments consultant les premiers étages du récepteur est primordial car il est ensuite amplifié en même temps que le signal. (BENTEJAC2007)

Nous nous intéressons dans cette partie au bruit à la réception du radar, qui peut être d'origine interne (généralisé par le mouvement des électrons) et externe capté par l'antenne avec les échos utiles). Les sources de bruit externe sont diverses :

- bruit atmosphérique : il est généralisé par la perturbation atmosphérique, il est négligeable au-dessus de 50 MHz.
- Bruit solaire : il est généralisé par le soleil. Il augmente avec le carré de la fréquence. Sa contribution aux fréquences radar est négligeable.

Aux fréquences radar, le bruit externe reste négligeable et la sensibilité du radar sera déterminée par le bruit interne et principalement par le bruit thermique.



**Figure 1.7 : Les différents bruits dans le radar.**

Le bruit thermique est une source interne de variations aléatoires du signal, que tous les composants électroniques génèrent de façon inhérente à différents degrés.

Ainsi, les sources de bruit thermique les plus importantes apparaissent au niveau du récepteur et beaucoup d'efforts sont faits pour minimiser ces facteurs. La présence de bruit provoque une dégradation du rapport signal/ bruit, cette dégradation s'exprime par le facteur de bruit, le facteur de bruit est une mesure du bruit produit par un récepteur comparé à celui produit par un récepteur idéal. Ce ratio doit être minimal.

La formule (19) montre qu'il est nécessaire d'obtenir un signal minimal utilisable  $S_{\min}$  aussi faible que possible. Cependant, ce signal doit avoir un certain niveau au-dessus du bruit propre du récepteur, il est donc nécessaire d'avoir un bruit propre du récepteur aussi réduit que possible. Il faut bien préciser que le bruit envisagé ici est le bruit thermique. (THOUREL1965)

Un conducteur de résistance  $R$ , à la température absolue  $T$  génère à ces bornes une tension de bruit qui est la conséquence du mouvement aléatoire des électrons, la tension quadratique du bruit est donnée par la formule suivante : (BENTEJAC2007)

$$e^2 = 4RkTB \quad (20)$$

$k$  : constante de Boltzman,  $k = 1,380 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

$T$  : température absolue en  $^\circ\text{K}$ .

$B$  : largeur de bande.

La puissance moyenne de bruit qui existe à l'intérieur du conducteur est donné par la formule d'Einstein : (THOUREL1965)

$$N = kTB \quad (21)$$

N est le facteur de bruit, il caractérise la contribution propre de récepteur au bruit qui accompagne le signal à la sortie. (BENTEJAC2007)

Le facteur de bruit évalue la qualité d'un récepteur, ce facteur quantifie la dégradation relative du rapport signal sur bruit qu'il apporte quand le bruit en entrée est un bruit thermique à la température normalisée  $T_0=290$  K.

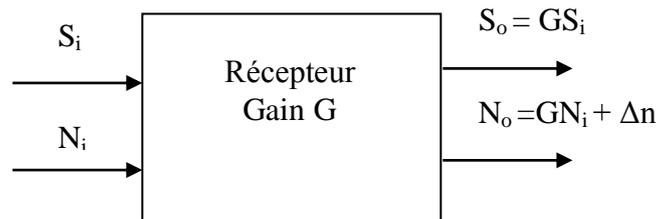
Le facteur de bruit est donné par :

$$N = \frac{\text{puissance signal entrée / puissance bruit entrée}}{\text{puissance signal sortie / puissance bruit sortie}} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (22)$$

$$N > 1$$

Supposons qu'à l'entrée nous avons un bruit  $N_i$ ,

$$N_i = kTB \quad (23)$$



**Figure 1.8 : Le gain d'un récepteur**

Ce qui donne 
$$N = \frac{S_i/kTB}{GS_i/N_o} \quad (24)$$

D'où : 
$$N = \frac{N_o}{GkTB} \quad (25)$$

Le facteur de bruit N caractérise la contribution propre du récepteur au bruit qui accompagne le signal à la sortie. (BENTEJAC2007)

## **1.7. Types de radar:**

### **1.7.1. Le Radar Primaire (PSR ou Primary Surveillance Radar) :**

Le radar classique, dit radar primaire résulte d'une technologie ne nécessitant pas de la coopération de la cible. Un émetteur envoie des impulsions hyperfréquences à l'aide d'une antenne; les impulsions sont partiellement réfléchies par l'objet volant et reviennent à l'antenne. Un récepteur mesure le temps entre l'émission et le retour des impulsions. Cette durée et la direction de l'impulsion permettent de calculer la position de l'objet volant (distance et azimut). Les radars primaires permettent de détecter et de suivre dans l'espace aérien surveillé tous les objets qui réfléchissent suffisamment les ondes radars (y compris les phénomènes météorologiques, les vols d'oiseaux, les planeurs de pente, etc). Les informations délivrées par le radar primaire, peuvent être partiellement filtrées. Le PSR n'est pas absolument nécessaire pour le contrôle du trafic aérien, mais indispensable pour la surveillance de l'espace aérien.

### **1.7.2. Le Radar Secondaire (SSR ou Secondary Surveillance Radar) :**

#### ***1.7.2.1. Introduction:***

L'augmentation du trafic aérien, la rapidité des avions modernes et les exigences du contrôle de la circulation aérienne amènent à envisager l'étude et la mise en place de systèmes de radiodétection susceptibles de donner au contrôleur le maximum d'information sur les trafics dont il a la charge.

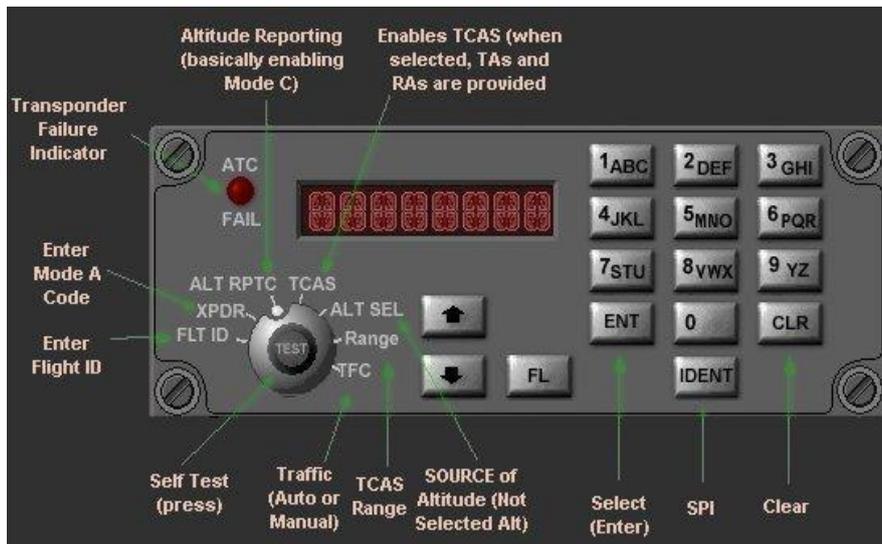
Un système permettant de disposer, en plus des informations « azimut –distance », de l'altitude et de l'identification des cibles, doit permettre de satisfaire certaines exigences du contrôle aérien. Le radar secondaire permet d'atteindre le but que l'on se fixe, à savoir :

- Détection d'une cible.
- Position de cette cible dans l'espace.
- Identification de la cible.

Dans un radar secondaire, un émetteur envoie à l'aéronef des impulsions hyperfréquences codées. L'aéronef répond à la demande du SSR à l'aide d'un "transpondeur" (**trans**mitting **responder**). Le récepteur du SSR analyse les informations contenues dans la réponse de l'aéronef. Le SSR est utilisé par la circulation aérienne civile depuis 1954.

#### ***1.7.2.2. Le Transpondeur:***

Le transpondeur est un système de bord permettant aux organismes de la circulation aérienne équipés d'un radar secondaire SSR (Secondary Surveillance Radar), parfois associé à un radar primaire classique, de connaître l'identification, la position, l'altitude, l'évolution et la vitesse des aéronefs.



**Figure 1.9 : L'afficheur de transpondeur.**

L'Organisation d'Aviation Civile Internationale (OACI) définit dans l'annexe 10 les modes d'interrogations utilisés dans les systèmes SSR:

Modes 1 to 3: Mode identification, pour besoin Militaire, IFF (identification friend or foe)

Mode 4: pour besoin Militaire IFF, mode identification (les interrogations et les réponses ont des formats différents des autres modes, avec des techniques de décryptage)

Mode A: militaire et civil identification.

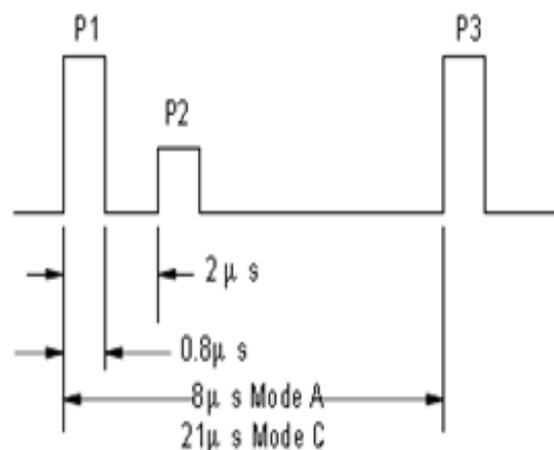
Mode B: il a été utilisé comme un deuxième mode d'identification, il n'est plus utilisé.

Mode C: Mode SSR transmettant l'altitude-pression.

Mode D: Mode SSR réservé pour un futur usage.

Mode S: Mode SSR avancé, ou une adresse de 24 bits est utilisé pour identifier l'aéronef.

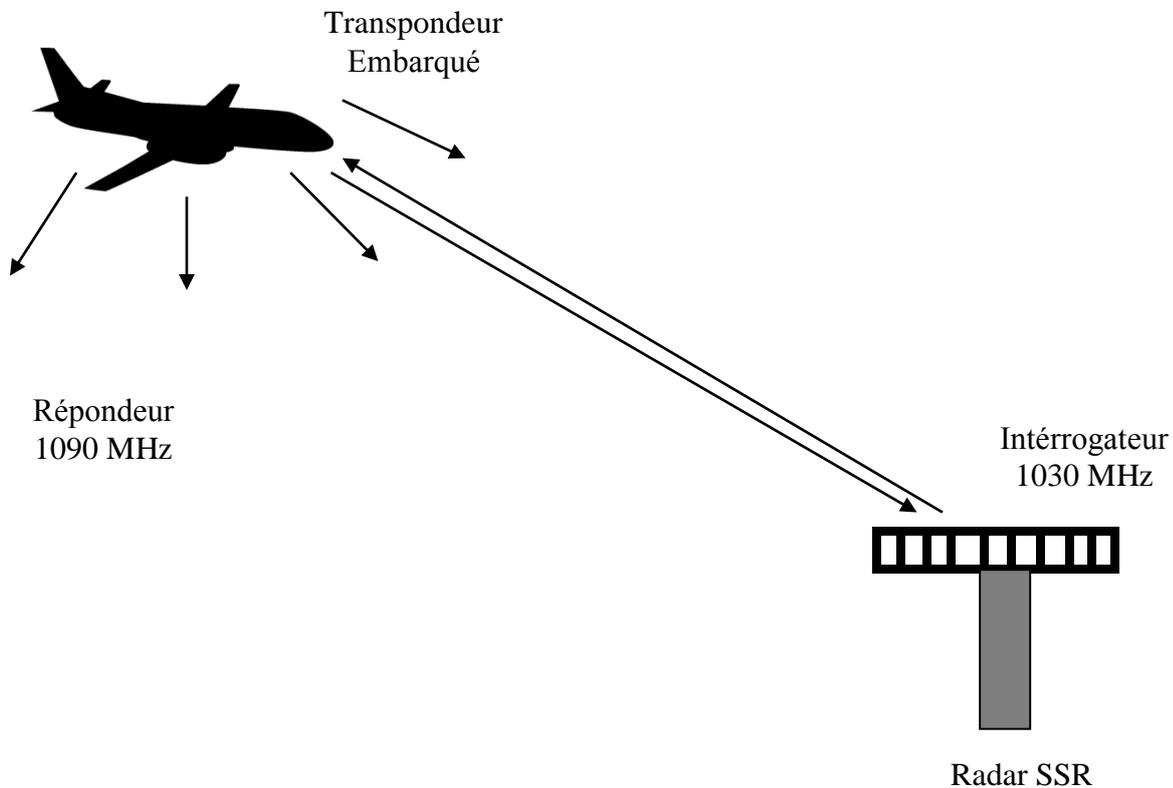
L'interrogation sera constituée par l'émission de deux impulsions que l'on désigne par P1 et P3, l'intervalle entre elles déterminent le type de mode d'interrogation. Une impulsion de commande P2 sera transmise après la première impulsion de l'interrogation pour permettre au transpondeur de rejeter les lobes secondaires. (ANNEXE10 2007)



**Figure 1.10 : Formats des signaux d'interrogations.**

### 1.7.2.3. Fonctionnement :

Le radar secondaire SSR associé parfois au radar primaire (UHF, 1300 MHz à 2900 MHz) émet sur une fréquence ultra haute UHF (1030 MHz) un signal d'interrogation sous la forme d'une impulsion codée à laquelle le transpondeur embarqué répond par une autre impulsion dans la même gamme UHF (1090 MHz). (DOC9684 1999)



**Figure 1.11 : Fonctionnement du radar secondaire**

La réponse décodée apparaît sur l'écran radar au sol sous la forme d'un écho comprenant les 4 chiffres affichés par le pilote à la demande du contrôleur (4 séries de 8 chiffres allant de 0 à 7 soit 4096 codes possibles). Dans le cas d'un vol sous plan de vol déposé au préalable, les 4 chiffres du code sont remplacés sur l'écran radar par l'indicatif de l'avion grâce à un ordinateur. Lorsque l'avion est équipé d'un transpondeur mode C (avec alticodeur), une information d'altitude-pressure apparaît également. Une fonction IDENT permet de faire apparaître en surbrillance sur l'écran radar, et sur demande du contrôleur, l'écho associé à l'aéronef en cas de doute sur l'identification de ce dernier.

Le contrôleur peut, par superposition de carte sur son scope, donner au pilote toutes les informations de position par rapport à une balise ou un terrain, par exemple. Il faut également savoir que les avions peuvent être équipés de système TCAS (Traffic alert Collision Avoidance System) : Les transpondeurs s'interrogent entre eux et donnent des alertes ou des résolutions au pilote équipé de ce système pour éviter un trafic inconnu, à condition que ce dernier ait branché son transpondeur en mode C.

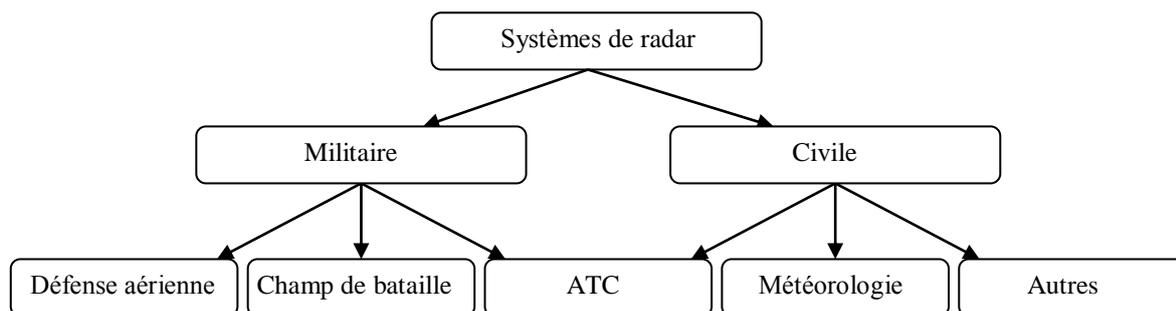
En cas d'urgence, de panne de communication radio, ou d'intervention illicite, les

pilotes devraient signaler respectivement les codes mode A suivants : 7700, 7600 et 7500. (DOC 4444 2001)

Les portées obtenues par le SSR sont très grandes, 250NM (450km) avec des puissances d'émission réduites par rapport à celles qui sont mises en jeu avec les radars primaires. (BENTEJAC2007)

## 1.8. Différents Radars utilisés au contrôle du trafic aérien:

Les radars peuvent être classés en deux catégories selon le domaine d'utilisation, en outre les applications différentes aussi dans chaque domaine selon les besoins.



**Figure 1.12 : Les domaines d'utilisation du radar.**

Nous nous intéressons dans cette partie aux différents radars utilisés au contrôle aérien (ATC radars):

### 1.8.1. Radar en route :

Le radar En route est un radar utilisé pour détecter et déterminer la position, le cap, et la vitesse des aéronefs à une grande distance, qui peut atteindre 250 NM.

### 1.8.2. Radar de surveillance terminal (TSR) :

Le Radar de surveillance terminal (TSR) est un radar d'approche utilisé pour détecter et afficher la position des aéronefs en région terminal. En général, le SSR est jumelé à un radar PSR (courte portée) pour les opérations en région terminale.

### 1.8.3. Radar d'approche de précision (PAR) :

Le radar d'approche de précision (PAR) est un radar primaire courte portée, mais haute définition, fonctionnant sur la plage de fréquences entre 9000 à 9180 MHz et servant d'aide à l'approche. Ce radar fournit au contrôleur des indications très précises sur l'altitude, l'azimut et la distance qui lui permettent d'aider un pilote à exécuter une approche surtout en présence de mauvaises conditions météorologique. Même si le "PAR" est principalement utilisé pour des opérations militaires, il est disponible à quelques aéroports civils et peut être utilisé par les pilotes civils.

#### 1.8.4. Radar de surveillance des mouvements de surface (SMR) :

La surveillance radar des mouvements de surface est fournie à certains aéroports lorsque les conditions le justifient. Ce radar de surveillance des mouvements de surface fait partie d'ASDE (Airport Surface Detection Equipment). Et c'est un radar PSR haute définition, utilisé par les contrôleurs de la tour pour surveiller la position des aéronefs et des véhicules sur les aires de manœuvres des aéroports (pistes et voies de circulation), particulièrement dans des conditions de visibilité réduite.

#### 1.8.5. Radar météorologique :

Les radars météorologiques sont très importants pour la gestion de trafic aérien (ATM), Il y a des radars météorologiques spécialement conçus pour la sécurité de trafic aérien.

### 1.9. Les plages de fréquences radar:

Quel que soit le domaine d'application, l'utilisation du radar permet d'assurer la sécurité par la prévention. Ces applications étant nombreuses, il a fallu déterminer une bande de fréquence d'utilisation pour chaque type de radar afin qu'il n'interfère pas avec d'autres types ou bien d'autres systèmes fonctionnant avec des ondes électromagnétiques tels que les téléviseurs, les radios, les téléphones portables... Cependant, les radars sont conçus pour fonctionner sur une bande de fréquence plutôt qu'une autre en fonction de l'application désirée (calcul de vitesse, calcul de position, portée du radar...). On peut regrouper les types de radar dans un tableau en fonction de la bande de fréquence sur lesquels ils fonctionnent (des Hautes Fréquences jusqu'aux radars millimétriques). (BENTEJA 2007) (SKOLNIK2008)

Nom de la bande	Fréquences	Longueurs d'onde	Commentaires
HF	3-30 MHz	10-100 m	Pour high frequency (haute fréquence). Utilisée par les radars côtiers et les radars "au-delà de l'horizon".
P	< 300 MHz	1 m+	Pour précédent : appliquée a posteriori aux radars primitifs
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Pour very high frequency (très haute fréquence). Utilisée par les radars à très longue portée et par ceux à pénétration de sol.
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Pour ultra high frequency (ultra haute fréquence). Radars à très longue portée (ex. détection de missiles balistiques), pénétration de sol et de feuillage.
L	1-2 GHz	15-30 cm	Pour long. Utilisée pour le contrôle aérien de longue portée et la surveillance aérienne, le GPS (et donc les radars passifs se basant dessus).

S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Pour short (court). Utilisée par les radars de trafic aérien local, les radars météorologiques et navals.
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Compromis entre les bandes S et X pour les transpondeurs satellitaires et les radars météorologiques.
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Pour les radars météorologiques, les autodirecteurs de missiles, les radars de navigation, les radars à résolution moyenne de cartographie et la surveillance au sol des aéroports.
Ku	12-18 GHz	1,67-2,5 cm	Fréquence juste sous K (indice 'u' pour under en anglais) pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire.
K	18-27 GHz	1,11-1,67 cm	De l'Allemand kurz (court). très absorbé par la vapeur d'eau, Ku et Ka sont utilisées pour la détection des gouttelettes de nuages en météorologie et dans les radars routiers (24.150 ± 0.100 GHz) manuels.
Ka	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Fréquence juste au-dessus de K (indice 'a' pour "above" en anglais) pour la cartographie, la courte portée, la surveillance au sol des aéroports, les radars routiers (34.300 ± 0.100 GHz) automatisés, et les radars anti-collision montés sur les voitures haut de gamme.
Mm	40-300 GHz	1 - 7,5 mm	Bande millimétrique subdivisée en quatre parties :
Q	40-60 GHz	5 mm - 7,5 mm	Utilisée pour les communications militaires. Très fortement absorbée par l'atmosphère.  Utilisée comme radar anti-collisions automobile et pour l'observation météorologique à haute résolution et de courte portée.
V	50-75 GHz	6.0 - 4 mm	
E	60-90 GHz	6.0 - 3,33 mm	
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	

## 1.10. Conclusion:

Tous les radars utilisent le phénomène de réflexion des ondes électromagnétiques sur les corps conducteurs, cette qualité étant prise dans un sens couvrant une large gamme de corps. Ainsi, un avion volant dans le lobe de rayonnement d'un radar revoie-t-il vers celui-ci une portion de l'énergie qu'il reçoit ; cette énergie réfléchie vers le radar est extrêmement faible en raison de l'atténuation qu'elle a subi le long du parcours radar-cible, et aussi de la réflexion elle-même. Cependant, cette énergie est suffisante pour pouvoir être décelée et traitée par le récepteur, puis présentée sur l'indicateur.

Le bruit joue un rôle très important en réception radar, car c'est sa présence qui vient limiter les possibilités de détection du signal utile.

La technologie radar date seulement de quelques dizaines d'années et l'évolution de ce type de système a été très importante jusqu'à nos jours, et le sera certainement encore pour de

nombreuses années.

Nous pouvons conclure, à partir de nos différentes recherches, que les buts principaux des systèmes radars se regroupent dans le domaine de la sécurité civile ou bien de la défense militaire.

# **Chapitre 2**

## Chapitre 2 : La couverture RADAR

### 2.1. Introduction :

La gestion de l'espace aérien nécessite une connaissance de l'étendue de la couverture radar pour déterminer les zones dans lesquelles, peut s'effectuer le contrôle radar, et les zones de non couverture radar, ou d'autres moyens de détection peuvent être déployés.

Les rayons électromagnétiques dans le vide subissent une incurvation due à la réfraction dans l'atmosphère. Nous savons, en effet, que le rayonnement de radar est affecté par les obstacles se trouvant sur sa trajectoire, ce qui produit la présence de signal radar dans certaines zones et son absence dans d'autres zones.

Le rayonnement d'un radar dépend :

- de son antenne,
- de sa portée maximum dans des conditions d'exploitations déterminées,
- de l'effet de sol,
- des conditions météorologiques.

Le but de ce chapitre est d'étudier les caractéristiques de propagation de l'onde radar et l'influence des obstacles se trouvant sur sa trajectoire.

### 2.2. Les antennes :

#### 2.2.1. Introduction :

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

Malgré grande diversité, toutes les antennes ont en commun de transformer un signal guidé en un signal rayonnant (ou réciproquement), dans un spectre électromagnétique relativement large allant des ondes radio aux hyperfréquences. Un principe fondamental régit leur rayonnement, celui de la diffraction des ondes. (PICON et al2009)

#### 2.2.2. Rôle des antennes radar :

Comme toute installation radio, l'antenne d'un radar a pour rôle de rayonner dans l'espace et de capter de l'énergie sous formes de champs électromagnétiques à hautes fréquences.

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

**Antenne de réception :** De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une

antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte de la lumière issue des étoiles et la transforme.

**Réciprocité :** dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque.

Du fait de la réciprocité des antennes, il ne se sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas. (PICON et al2009)

En radar, ainsi que dans d'autres domaines de radio communication, on emploie des antennes directives, c'est-à-dire des antennes dont le rayonnement est concentré dans un angle solide, c'est-à-dire autour d'une direction privilégiée. Parfois, le rayonnement est réparti d'une façon symétrique autour de cette direction

### **2.2.1. Rayonnement de l'antenne Radar Secondaire :**

Quand un système de surveillance radar génère une interrogation, elle est prévue pour une cible spécifique. Dans un monde idéal seulement cette cible reçoit et répond à cette interrogation. Cependant, il n'existe pas une antenne parfaitement directionnelle, et toutes les antennes transmettent des ondes radio dans les directions autres que celle voulue.

Pour produire un rayonnement étroit (exemple  $3^\circ$ ) cela nécessite une antenne qui a un diamètre qui est 20 fois la largeur de l'onde. Pour un SSR cela représente  $20 \times 30$  cm ou 6m, cela n'est pas toujours pratique.

Pour résoudre ces problèmes, L'antenne de radar secondaire fournit simultanément trois diagrammes de rayonnement : la somme, la différence ou mono impulsion et le signal de suppression de lobes secondaire(SLS).

Ces diagrammes ont la même forme de rayonnement dans le plan vertical, Et dans le plan horizontal chaque diagramme a sa propre forme de rayonnement :

- diagramme de la somme : diagramme à lobe principal étroit à gain élevé.
- diagramme de la différence : rayonnement mono impulsion qui donne une estimation de la position de transpondeur à l'intérieure de lobe principal de diagramme de la somme.
- Diagramme de suppression des lobes secondaire : c'est approximativement un diagramme d'antenne omnidirectionnel, qui est utilisé pour éliminer les réponses reçues par les lobes secondaire.

Les trois rayonnements sont accessibles à travers les trois connecteurs d'entrée.

### **2.2.2. Les fausses cibles.**

Le système SSR utilise des fréquences distinctes pour l'interrogation et la réponse, ce qui élimine les fausses cibles qui apparaissent sur les radars primaires à cause de l'écho de

sol, des échos de phénomènes atmosphériques et des «anges». Les réponses en lobes secondaires sont évitées grâce aux circuits de suppression des lobes secondaires (SLS) des transpondeurs. Une protection supplémentaire peut être assurée par la fonction de suppression des lobes secondaires dans le récepteur (RSLS), au sol. Les interrogations et les réponses reçues par l'intermédiaire de surfaces réfléchissantes peuvent produire de fausses cibles dans le cas des systèmes SSR modes A/C. On peut utiliser un certain nombre de techniques pour réduire ce problème. Dans un environnement SSR mode S intégral, il ne devrait plus y avoir de fausses cibles. Dans ce cas en effet, l'interrogation sélective ne peut être transmise que lorsque l'aéronef est à l'intérieur du faisceau direct de l'antenne et jamais s'il se trouve dans le faisceau réfléchi.

### 2.3. Propagation de l'onde radar:

Dans l'espace libre, les ondes radios se propagent en lignes droites. Cependant dans l'atmosphère terrestre, les ondes radios sont généralement courbées vers la terre, cela est dû à la variation de l'indice de réfraction.

Au point de vue radioélectrique, l'atmosphère terrestre dite claire (c'est à dire ne contenant pas de particules liquides ou solides) est caractérisée par son indice de réfraction, qui dépend des grandeurs météorologiques (pression, température, humidité) et qui par conséquent est une fonction de l'espace et du temps.

L'indice de réfraction  $n$ , ou la réfractivité  $N$ , peuvent être approximés par: (BRUNNER1984)

$$(n - 1) * 10^6 = N = \frac{77.6 * P}{T} + \frac{3.73 * 10^5 e}{T^2} \quad (10)$$

Où

P: la pression barométrique en millibars.

e: la pression partielle de la vapeur d'eau en millibars

T: la température en degré kelvin.

Compte tenu de la complexité de la fonction de l'indice de réfraction, on est conduit à poser des hypothèses simplificatrices.

Il existe un artifice de calcul d'un emploi très courant. Il consiste à utiliser un rayon terrestre fictif choisi de telle façon qu'en comptant les altitudes à partir de cette surface terrestre fictive, les trajectoires sont rectilignes. Cette nouvelle surface terrestre est donc supposée placée dans une atmosphère d'indice constant.

On définit ainsi une sphère de rayon  $Ka$  pour laquelle les trajectoires sont rectilignes,  $a$  est le rayon de la terre,  $K$  est appelé coefficient multiplicateur du rayon terrestre, définit par:

$$K = \frac{1}{(1 + a * \frac{dN}{dh})} \quad (11)$$

La diminution de la réfractivité avec l'altitude est définie par  $dN/dh$  (gradient), la valeur de cette quantité détermine le mode de propagation.

On appelle *atmosphère normale* une atmosphère sphérique dont le gradient vertical serait constant et aurait pour valeur:

$$dN/dh = -39 \text{ unités N par Kilomètre.} \quad (12)$$

Les trajectoires ne sont alors des droites que pour cette atmosphère particulière ce procédé est très utilisé pour déterminer les hauteurs des antennes de faisceaux hertziens.

Et pour une telle atmosphère on trouve donc approximativement:

$$K \equiv 4/3 \text{ Ou } Ka \equiv 8500 \text{ km} \quad (13)$$

C'est cette valeur du rayon terrestre modifié qu'on prend généralement pour les calculs, elle représente une valeur moyenne en climat tempéré. (BOITHIAS1983)

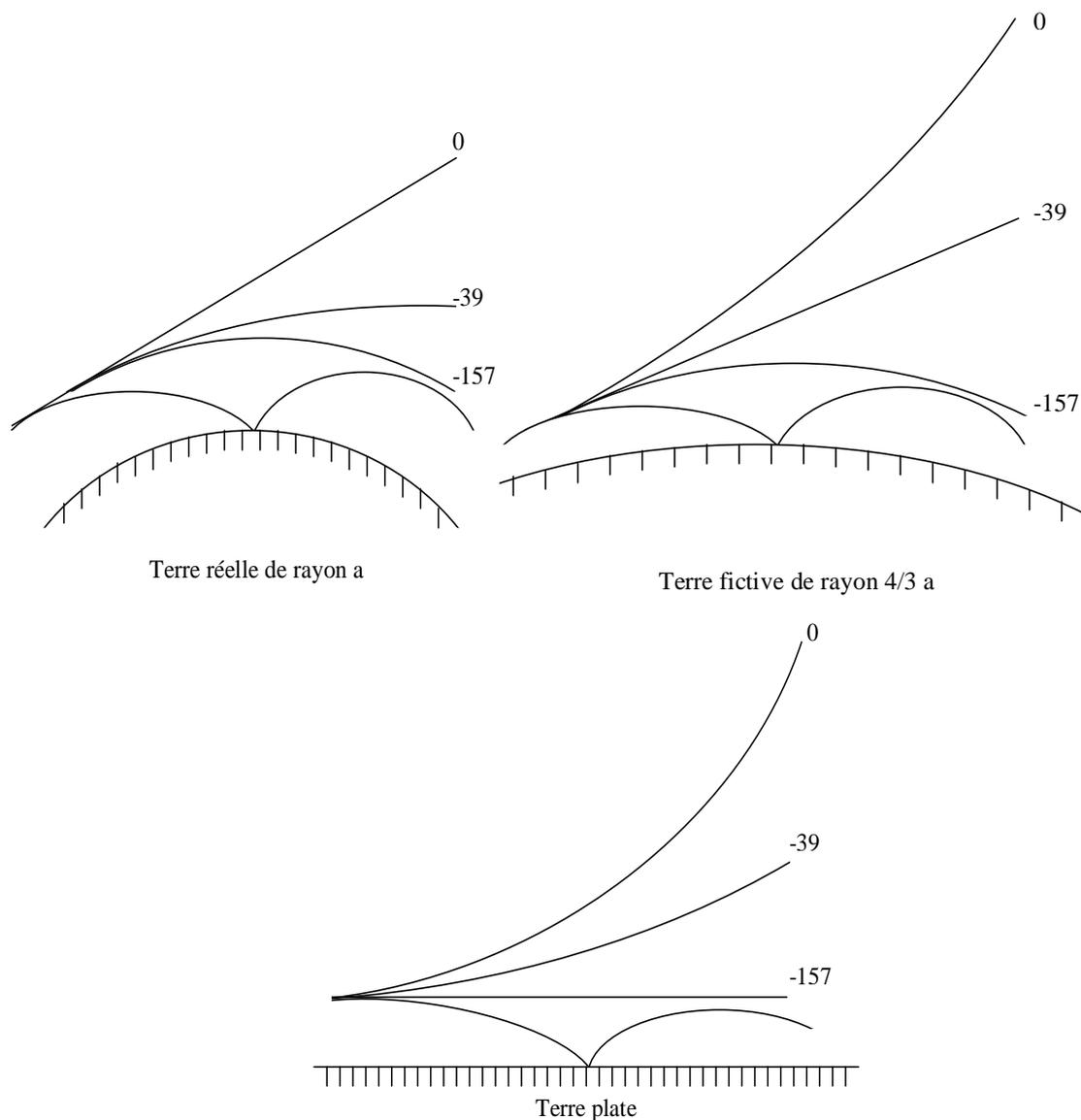
Si la valeur algébrique de gradient est supérieure à -39 N/km on dit qu'il y a infra-réfraction, les trajectoires sont moins courbées et le rayons apparent de la terre est inférieure à 8500 Km. En particulier, si le gradient est nul l'atmosphère est linéaire, les trajectoires sont des droites. Si le gradient est positif le rayon apparent de la terre est inférieur à son rayon réel.

Si la valeur algébrique du gradient vertical de l'indice de réfraction est inférieure à -39 N/Km, on dit qu'il y a supraréfraction (ou superréfraction).

Si la valeur de K est supérieure à 4/3, c'est-à-dire que le rayon apparent de la terre est supérieur à 8500 Km. La courbure des trajectoires est supérieure à sa valeur normale.

En particulier si le gradient est inférieure à -157N/Km la valeur de K devient négative. Les trajectoires sont alors plus courbées que la surface terrestre. Elles reviennent alors vers le bas et elles peuvent éventuellement être réfléchies par le sol. Il y a propagation guidées ou propagation par conduit.

La figure 2.1 illustre les trois représentations possibles d'une trajectoire, suivant que l'on utilise la terre réelle, une terre fictive de rayon 8500Km (K=4/3) ou une terre plate. Le gradient vertical qui donne un tracé rectiligne n'est évidemment pas le même dans les trois cas (voir la figure suivante).



**Figure 2.1 Diverses représentations d'une trajectoire avec 3 valeurs particulières du gradient.**

## 2.4. Détermination de la couverture radar:

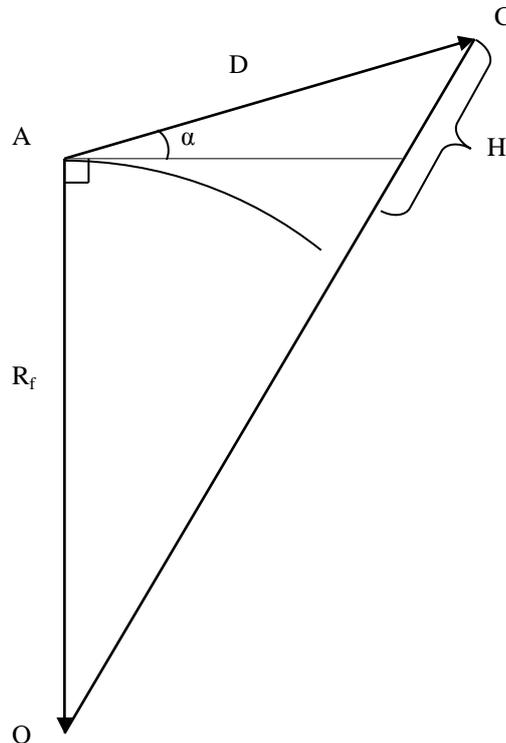
### 2.4.1. Introduction:

Les rayons électromagnétiques rectilignes dans le vide subissent une incurvation due à la réfraction dans l'atmosphère. Cette courbure risque d'apporter des erreurs dans le calcul de la portée.

La méthode classique de calcul pour réduire l'erreur consiste à utiliser le rayon terrestre fictif dans le calcul de la distance oblique  $D$  (la portée). Dans ces conditions, les rayons de propagation sont des droites. (Cadoret1984)

### 2.4.2. Calcul de la limite inférieure de rayonnement:

Considérons la figure ci-dessous.



**Figure 2.2 : Détermination de la hauteur d'une cible.**

$\alpha$ : L'angle d'élévation (ou angle de site) au-dessus de l'horizontale locale, avec  $\alpha \geq 0$ .

H: la hauteur de la base du rayonnement de l'antenne radar au-dessus d'une altitude de référence (sol ou niveau de la mer).

D: la distance oblique (la portée du radar).

$R_f$ : le rayon fictif terrestre.

Considérons le triangle OAC.

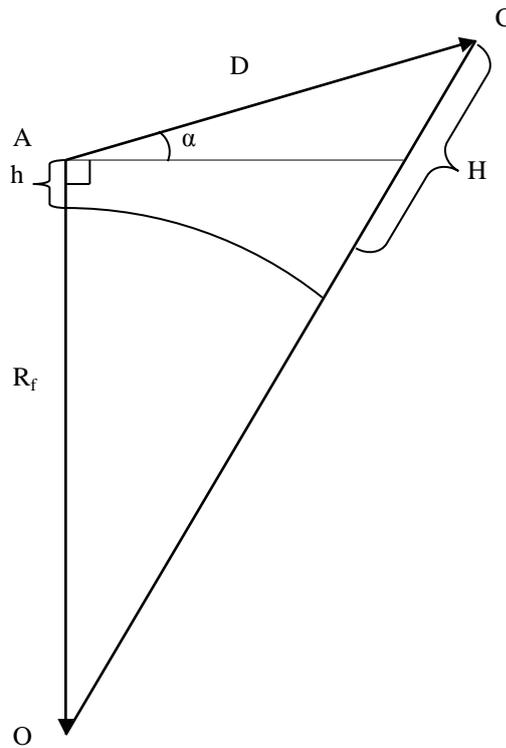
Nous avons :

$$(R_f + H)^2 = D^2 + R_f^2 + 2 * R_f D * \sin\alpha \quad (14)$$

D'où :

$$H = \sqrt{D^2 + R_f^2 + 2R_f * D * \sin\alpha} - R_f \quad (15)$$

Considérons le cas illustré par la figure ci-dessous.



**Figure 2.3 : Détermination de la hauteur d'une cible.**

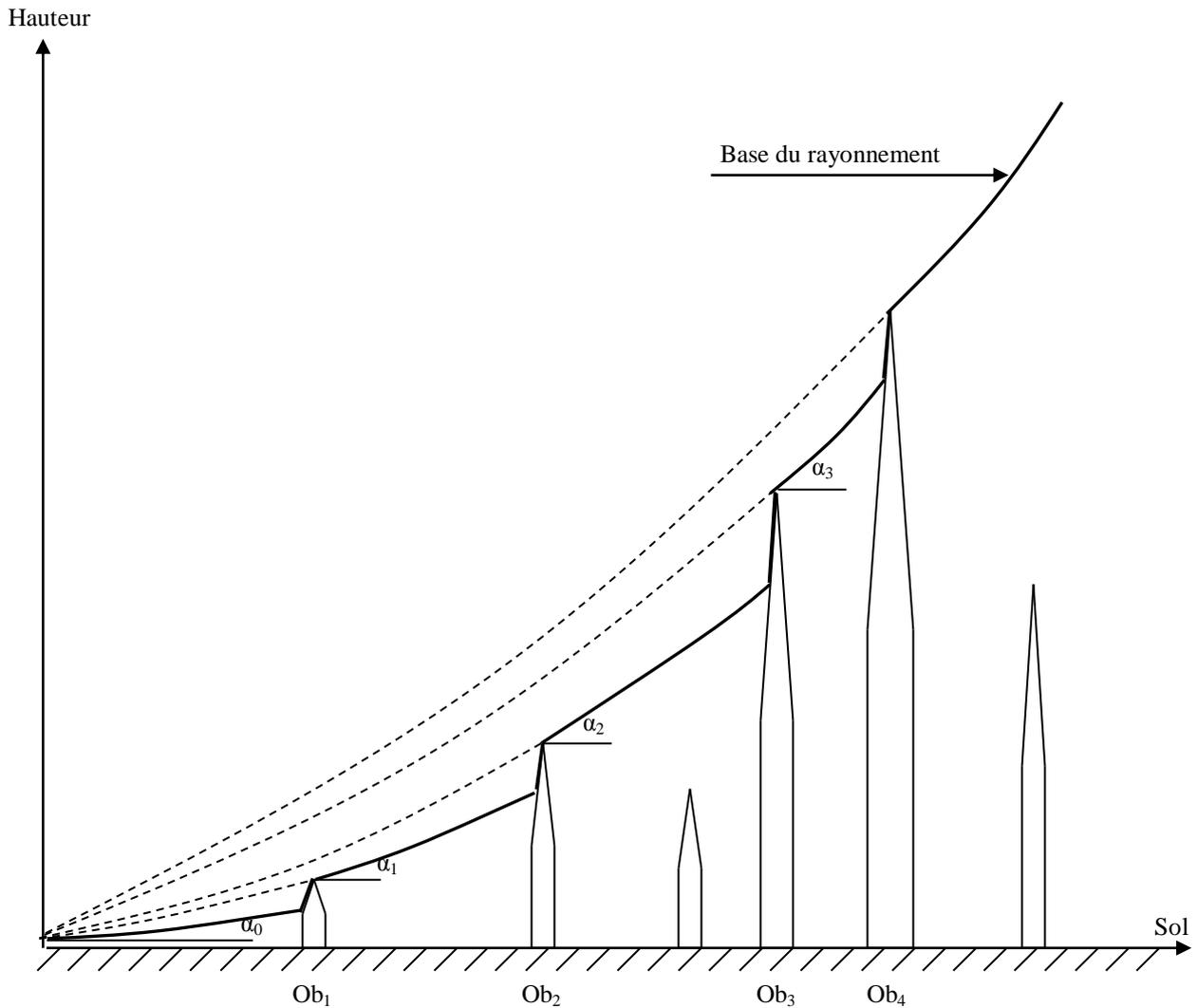
- $\alpha$ : L'angle d'élevation (ou angle de site) au-dessus de l'horizontale locale, avec  $\alpha \geq 0$ .
- H: la hauteur de la base du rayonnement de l'antenne radar au-dessus d'une altitude de référence (sol ou niveau de la mer).
- D: la distance oblique (la portée du radar).
- $R_f$ : le rayon fictif terrestre.
- h: la hauteur de l'antenne radar au-dessus d'une altitude de référence (sol ou niveau de la mer).

Considérons le triangle OAC.

D'où:

$$H = \sqrt{D^2 + R_f^2 + 2R_f * D * \sin\alpha} - R_f + h \quad (16)$$

### 2.4.3. Calcul de la limite inférieure de rayonnement en présence d'obstacle:



**Figure 2.4 : Le rayonnement du radar en présence de reliefs.**

En se référant à la figure 2.4, Pour tous les points compris entre le radar et le premier obstacle qui bloque une partie de rayonnement radar, la hauteur de la base de rayonnement se calcule par l'équation (16), avec  $\alpha = \alpha_0$  qui est l'angle d'élévation de l'antenne radar.

Entre le premier obstacle et le deuxième obstacle qui bloquent le rayonnement, la hauteur de la base du rayonnement est la même que si on utilise un angle d'élévation  $\alpha_1$ , qui donne un rayonnement dont sa base rase ce premier obstacle.

$$\text{Avec: } \alpha_1 = \arcsin \frac{(H+R_f-h)^2 - D^2 - R_f^2}{2 * R_f * D} \quad (17)$$

Et :  $H = H_{obst1}$

Entre le deuxième et le troisième obstacle qui bloquent le rayonnement, la hauteur de la base du rayonnement radar est la même que si on utilise un angle d'élévation  $\alpha_2$ , qui donne

un rayonnement dont sa base rase ce deuxième obstacle.

$$\text{Avec : } \alpha_2 = \arcsin \frac{(H+R_f-h)^2 - D^2 - R_f^2}{2 * R_f * D} \quad (18)$$

$$\text{Et : } H = H_{obst2}$$

Entre le troisième et le quatrième obstacle qui bloquent le rayonnement, la hauteur de la base du rayonnement radar est la même que si on utilise un angle d'élévation  $\alpha_3$ , qui donne un rayonnement dont sa base rase ce troisième obstacle.

$$\text{Avec : } \alpha_3 = \arcsin \frac{(H+R_f-h)^2 - D^2 - R_f^2}{2 * R_f * D} \quad (19)$$

$$\text{Et : } H = H_{obst3}$$

Nous suivant ce processus de calcul à chaque fois qu'il y a un obstacle qui bloque le rayonnement de l'antenne radar.

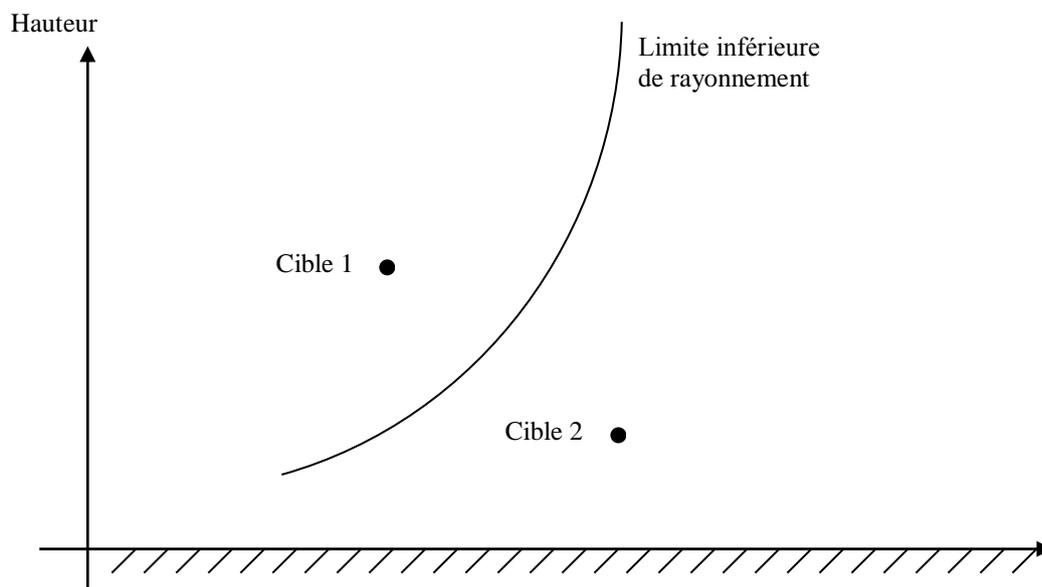
#### **2.4.4. La détection d'une cible:**

En premier, nous avons défini dans la partie précédente la limite inférieure de la couverture radar.

En second, nous vérifions la présence de signal radar à chaque point de l'espace. Cela se fait en comparant l'altitude de la cible en une position précise par rapport à la limite inférieure du rayonnement radar à cette position, figure suivante.

Si la cible se trouve au-dessus de la limite inférieure du rayonnement, ce que signifie que la cible est à l'intérieure de rayonnement radar d'où présence de signal radar en ce point (cas de la cible 1).

Dans le cas contraire, c.à.d. Si la cible se trouve au-dessous de la limite inférieure du rayonnement, ce que signifie que la cible est à l'extérieure de rayonnement radar d'où absence de signal radar en ce point (cas de la cible 2).



**Figure 2.5 : Position de la cible par rapport à la limite inférieure de rayonnement.**

Ainsi l'ensemble de points où il y a détection de signal radar représente le volume de la couverture radar.

Cette couverture radar en 2D (deux dimensions) à une hauteur  $H$  au-dessus de niveau de la mer est établie par l'intersection d'un plan horizontal qui se situe à la hauteur  $H$  et le volume de la couverture radar.

## 2.5. Conclusion :

Les ondes électromagnétiques se propagent bien dans l'atmosphère pour des fréquences basses du spectre radiofréquence jusqu'à des fréquences de l'ordre d'une vingtaine de giga hertz.

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter.

La croissance de l'indice de réfraction avec l'altitude a pour conséquence de courber le faisceau en direction du sol. Compte tenu de la complexité de la fonction de l'indice de réfraction, on est conduit à utiliser un artifice de calcul simplificateur. Il s'agit d'utiliser le rayon terrestre fictif. Cette nouvelle surface terrestre est donc supposée placée dans une atmosphère d'indice constant dans ce cas la propagation est rectiligne.

La couverture radar est le volume de l'espace aérien qui est balayé par un radar ou par un réseau de radars, la détermination de l'espace aérien sous couverture radar est nécessaire pour décider des emplacements des radars avant toute installation, afin d'avoir un plus grand espace couvert tenant compte de la topographie de terrain et des obstacles.

La couverture radar des cinq radars secondaires de l'établissement nationale de la navigation aérienne sera présentée dans le prochain chapitre

# **Chapitre 3**

## Chapitre 3 Les systèmes d'informations géographiques

### 3.1. Introduction:

En suisse et au Québec, le terme SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) est utilisé pour évoquer les outils logiciels (systèmes informatiques) mis en œuvre dans les organisations et susceptibles d'assurer les quatre grandes fonctions informatiques (saisie et acquisition, gestion et stockage, analyse et enfin affichage/édition/présentation sur des données graphiques)

En France, le terme SIG (Systèmes d'Informations Géographiques) est couramment utilisé pour désigner à la fois le logiciel permettant de manipuler des données géographiques et le système d'information.

Deux autres définitions des SIG sont couramment utilisées et peuvent être rappelées. La définition proposée par Michel Didier (« un ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision »), se focalise sur la structuration de des données et la finalité de d'aide à la décision.

Une autre définition de Robert Laurini définit le SIG comme « un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées.» et s'intéresse plus particulièrement à ses grandes fonctionnalités. (PORNON2011)

Quant aux possibilités de son utilisation, un SIG se distingue considérablement d'une base de données conventionnelle. Les bases de données conventionnelles peuvent contenir aussi des informations spatiales (p.ex. adresses). Mais seulement avec le géoréférencement, des relations spatiales entre les données peuvent être déterminées exactement (p.ex. mesure des distances ou des surfaces, calcul des surfaces nouvelles issues de la superposition des surfaces avec des attributs différents etc.) et sont ensuite visualisées sous la forme d'une carte.

### 3.2. Fonctionnalités d'un SIG :

Les systèmes d'informations géographiques peuvent être constitués pour répondre à différentes demandes. Comme le système universel n'existe pas, il faut les adapter selon les objectifs fixés. Toutefois ils ont en commun des fonctionnalités que l'on retrouve dans chaque système regroupées en 5 familles sous le terme des "5A" pour : **Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse.** (MARMONIER2002)

Ces termes résument les fonctionnalités que tous les systèmes doivent assurer mais cachent leur diversité : différents modèles mis en œuvre, nombreuses applications, présentations multiples des données, variété des informations et capacités de stockage.

#### 3.2.1. L'Abstraction:

Les systèmes d'information géographique sont utilisés pour réaliser des descriptions du territoire permettant d'obtenir l'information nécessaire pour répondre à une problématique. Ils contiennent cette information sous plusieurs formes dont certaines sont des représentations

d'éléments ou de phénomènes existants. Ces représentations cherchent à reproduire le plus fidèlement possible la réalité d'une manière compréhensible par les utilisateurs et utilisable informatiquement dans le but de répondre à des objectifs donnés. Il est donc nécessaire de préciser les éléments sur lesquels on doit disposer d'information et la nature de celle-ci. Un parallèle peut être établi avec la représentation cartographique du territoire qui comprend des éléments choisis selon leur nature et selon des spécifications données afin de répondre aux besoins des utilisateurs identifiés. Leur dessin est effectué en respectant des règles sémiologiques destinées à faire percevoir facilement un maximum d'informations aux lecteurs de la carte. Les choix portent sur la nature de l'information qui doit être accessible, sur les éléments du territoire qu'il faut pouvoir identifier et séparer de leur contexte, sur la manière de les dessiner et sur les critères ou sur les propriétés qui doivent être perceptibles. Ces choix sont effectués en fonction d'objectifs à atteindre ou plus généralement en fonction des problématiques à résoudre. Le monde réel est ainsi modélisé en fonction des besoins, ce qui permet de définir précisément le contenu du système.

Les SIG (au sens des logiciels) gèrent plusieurs types de supports d'information correspondants à plusieurs familles de données: certaines sont dites « vectorielles »: les objets réels sont représentés ou schématisés par un élément ayant une forme et des propriétés, d'autres sont dites « raster » telles les photographies. Enfin ils peuvent accepter des éléments sans forme tels que des données textuelles, vidéo ou numériques sans géométrie. La modélisation doit préciser l'information qui devra être accessible et rechercher la forme la plus adaptée pour permettre de la représenter. Les photographies amènent par exemple des informations visuelles globales sur une partie d'un territoire mais ne permettent pas de traiter en particulier les objets visibles sur la photographie car ces derniers ne peuvent être isolés de leur contexte. Il faut en effet interpréter l'information visuelle pour accéder aux objets visibles, opération qui n'est pas réalisable par un ordinateur.

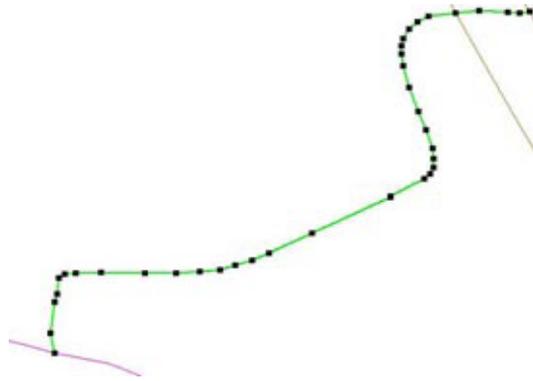
### **3.2.2. L'Acquisition:**

Les éléments que doit contenir le système sont connus dès que le modèle conceptuel est établi et que sont précisées les informations géométriques et sémantiques nécessaires. Les données doivent ensuite être intégrées et doivent répondre aux exigences de qualité induites par les objectifs à atteindre. Ces données peuvent provenir de fournisseurs extérieurs, de numérisation directe ou de traitements particuliers comme des images satellitaires par exemple. Les données peuvent être de quatre types différents selon la géométrie qui leur est associée: les données raster, les données vecteurs, les grilles ou MNT et les données sans géométrie.

#### **3.2.2.1. Les Vecteurs :**

La description par vecteur est utilisée pour identifier et localiser les éléments du territoire dont il est nécessaire de connaître les caractéristiques géométriques ainsi que les propriétés. Ces éléments pourront être identifiés précisément, représentés visuellement par des objets géométriques et dont certaines propriétés, outre la géométrie et la localisation, seront gérées. Il est possible d'isoler ces éléments de leur contexte car on a accès à leurs propriétés géométriques et à leurs propriétés sémantiques. Il existe en général trois sortes de données vecteurs : les points, les arcs et les polygones. Les éléments les plus simples sont représentés par un point. Lorsqu'il ne s'agit pas de points de repère, le fait de les représenter par un simple point signifie que leur géométrie exacte est inconnue, qu'elle n'est pas utile ou que sa forme a été généralisée. L'utilité du point est de permettre la localisation précise de l'objet ou d'un

renseignement comme un toponyme, un point géodésique ou une valeur descriptive.



**Figure 3.1 : Exemple d'un vecteur.**

### **3.2.2.2. Les Rasters :**

Les données de type raster sont principalement des photographies numériques, des photographies scannées, des images satellitaires ou des plans scannés. Ces données, couvrant une surface, sont constituées par une succession de points voisins disposés en général en ligne et en colonne et porteurs chacun d'une unique information radiométrique ou colorimétrique. Il s'agit de données globales fournissant des informations visuelles dans la plupart des cas sur un territoire mais ne permettant pas un accès direct aux éléments visibles car ceux-ci ne sont identifiés en tant que tels. L'identification de détails ne se fera qu'avec une interprétation des données visuelles par un opérateur. La seule information des points constituant l'image raster est une valeur et non pas un lien avec un objet du territoire identifié. Il faut procéder à une analyse visuelle, à une vectorisation ou à un traitement d'image pour relier ensemble plusieurs points d'une image raster afin de recréer des objets. Sans ces opérations, il est impossible d'isoler automatiquement des objets représentés ou plutôt présents sur l'image. L'image raster est un élément important dans la communication car il apporte au lecteur une information globale.

Une image raster est soit une collection ordonnée de points rangés en ligne et en colonne, soit une reproduction numérique d'un document ou d'un territoire. Chaque point de l'élément raster possède des coordonnées intrinsèques par rapport à un des coins de l'image par exemple. Les coordonnées d'un point peuvent être obtenues en utilisant l'écart qui le sépare du point origine de la zone. Il est toujours possible de changer de repère entre celui du cliché ou du raster et celui du chantier.



**Figure 3.2 : Exemple d'image satellitaire.**

### ***3.2.2.3. Les Informations Complémentaires :***

Ces données n'ont pas de géométrie propre, et ne peuvent pas être représentées directement. Elles sont toutefois dotées d'une Dimension géométrique dans la mesure où elles sont reliées par un lien à un objet parfaitement repéré. Ce lien peut être une adresse postale par exemple ou une relation vers un objet localisé.

Traditionnellement ces données sont intégrées au SIG soit directement comme attribut des objets auxquels elles font référence, soit elles sont représentées sous forme de point disposant d'un attribut contenant le renseignement. La différence entre les deux approches concerne l'importance que l'utilisateur souhaite donner à la relation existant entre les objets et les renseignements complémentaires. Une relation forte nécessite d'introduire le renseignement comme attribut de l'objet. Il est ainsi assuré d'un lien univoque entre les renseignements et les éléments de la base de données. Dans l'autre optique, rien n'assure en effet que les renseignements que l'on souhaite introduire sont relatifs à des objets existants. La relation créée est ainsi plus faible que dans l'autre approche.

### ***3.2.2.4. Le Modèle Numérique De Terrain :***

Un *modèle numérique de terrain* (MNT) est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre (ou d'une planète tellurique) sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur). La qualité d'un MNT dépend ainsi directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré.

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- maillage carré/rectangulaire
- maillage hexagonal

- maillage triangulaire régulier
- maillage triangulaire quelconque

En fonction du type de maillage, la représentation informatique du MNT varie. Dans le cas de maillages rectangulaires, on peut utiliser des tableaux, mais dans les autres cas, les structures de données sont plus complexes.

Les systèmes d'information géographiques (SIG) intègrent de plus en plus la troisième dimension sous forme d'un MNT, bien que les coûts liés à l'acquisition de l'information d'altitude soient relativement élevés. Cela permet d'utiliser ces SIG pour des applications comme le calcul d'implantation d'infrastructures de transport (conduites souterraines, voies terrestres, lignes électriques aériennes, antennes GSM...). Dans ce cas, et en fonction de la résolution du MNT, on y intègre les informations liées à la couverture du terrain par des bâtiments ou des végétaux, pour additionner leur hauteur à l'altitude du terrain sur lequel ils sont situés

### **3.2.3. L'Archivage :**

Le Système d'information géographique rassemble de l'information afin de permettre son utilisation dans des applications variées. Pour permettre un accès efficace aux différentes données, des logiciels informatiques ont été créés en utilisant les retours d'expériences des systèmes classiques et ceux des systèmes de dessin assisté par ordinateur (DAO). Les moteurs de bases de données sont utilisés pour gérer les objets comme dans un système classique car la géométrie peut être perçue comme une propriété au même titre que les attributs classiques tant que l'on ne cherche pas à l'utiliser dans des requêtes.

Le SIG possède des capacités de traitements spécifiques à la composante géométrique et offre une palette d'outils permettant de travailler avec en particulier dans les calculs de proximité ou dans les recherches basées sur des critères géométriques. Pour prendre en compte la spécificité géographique plusieurs méthodes de gestion sont possibles autant au niveau logique qu'au niveau physique. Au niveau logique, certains systèmes informatiques gèrent simultanément les données géométriques et les données attributaires alors que d'autres séparent ces deux types de données. Cela entraîne des conséquences car les possibilités de traitements ne sont pas les mêmes. De plus au niveau physique, les bases de données peuvent être réparties sur plusieurs sites, le lien étant réalisé par des serveurs.

### **3.2.4. L'Affichage:**

Le propre des informations manipulées dans un SIG est qu'elles sont localisées et pour la plupart dotées d'une géométrie. Elles décrivent un territoire qui peut ainsi être visualisé dans sa totalité ou partiellement selon une échelle variable. Les moteurs informatiques fournissent des outils extrêmement performants pour une visualisation rapide. Les sélections de certains objets selon des critères variés permettent des approches thématiques visualisées par le SIG. L'information visuelle occupe une place de plus en plus importante dans la société actuelle. En particulier les SIG fournissent des outils permettant de visualiser très rapidement un territoire de multiples façons selon des thématiques choisies et avec une échelle adaptée. La disponibilité quasi instantanée des données dans un système de gestion permet la réutilisation permanente des données. Les règles sémantiques de la cartographie s'appliquent aussi aux produits dérivés d'un SIG.

Les règles sémiologiques d'édition s'appliquent pour les produits numériques afin que l'utilisateur puisse comprendre et utiliser aisément les données. La principale nouveauté apportée par le numérique est que les informations peuvent être triées, sélectionnées et traitées en fonction des demandes. Il est ainsi possible de présenter les données selon un ou plusieurs thèmes, et les faire apparaître selon l'échelle de visualisation. Il est aussi possible de limiter leur usage en fonction de leur précision et en fonction de leur accessibilité. Les moteurs de SIG sont devenus très performants et les requêtes effectuées peuvent être compliquées de manière à répondre rapidement et complètement à des besoins d'analyses évoluées. Les SIG permettent ainsi de visualiser directement le résultat d'un traitement par opposition à la méthode traditionnelle consistant à repositionner et à croiser les informations sur un fond de plan. L'informatique permet aussi de rechercher et de mettre en valeur rapidement des éléments répondant à des critères précis. L'information visuelle est traitée dynamiquement par le SIG selon des règles adaptables selon les situations.

L'affichage (visuel) n'est pas la seule possibilité de communication offerte par les SIG. Par extension on peut considérer les possibilités d'échanges entre systèmes différents comme une possibilité nouvelle d'affichage au sens communication d'information. Différents SIG peuvent en effet utiliser des bases de données relatives au même territoire, et ainsi peuvent nécessiter des échanges de renseignements. De la même façon que le SIG permet de présenter les données à un utilisateur selon une convention adoptée, il doit permettre de fournir à d'autres systèmes et de lire en provenance d'autres systèmes des données en utilisant des règles d'échanges. Cela nécessite des transformations de format et de modélisation prenant en compte les spécificités de chaque logiciel.

### **3.2.5. L'Analyse:**

Les données contenues dans un système d'information géographique décrivent un terrain, et donc permettent d'appréhender les événements potentiels pouvant survenir. L'utilisation des données dans la résolution de problématiques variées valorisera d'avantage un système d'information. Les principales possibilités offertes par la mise à disposition de renseignements géométriques et de renseignements sémantiques concernent la mise en relation mutuelle d'objets localisés ayant certaines propriétés.

Les différentes relations que l'on peut mettre en œuvre concernent la proximité (trouver les objets proches d'un autre), la topologie (objets jointifs, inclus, partiellement inclus, exclus...) ou la forme (taille, type...). Comme les objets possèdent aussi des attributs traduisant des propriétés autres que géométriques, les analyses faites dans les systèmes d'information classiques, c'est à dire sans utiliser de fonction géométrique, peuvent être réalisées. Il est ensuite naturel d'utiliser une combinaison entre les propriétés géométriques et les propriétés sémantiques afin de réaliser une analyse complète.

Il est ainsi possible de rechercher les objets ayant certaines propriétés situés dans une zone donnée ou à une distance maximale d'un lieu fixé. Les informations supplémentaires amenées par les propriétés géométriques sont utilisées pour effectuer des traitements complexes qui affinent des analyses et qui accélèrent leur mise à disposition car elles peuvent souvent être réalisées avec un seul outil.

### **3.3. Les environnements de développement :**

#### **3.3.1. Introduction :**

La question du choix de l'environnement de développement se pose. Il s'agit ici d'effectuer une petite étude des principaux logiciels de SIG présents sur le marché et de connaître leurs potentialités afin de pouvoir déterminer avec lequel on doit travailler.

#### **3.3.2. Classification de logiciels SIG :**

Une très grande quantité de logiciels SIG est disponible. Les logiciels que nous allons étudier sont divisés en trois catégories: les logiciels de "géoingénierie", les logiciels de "SIG experts" et les logiciels "SIG de bureau".

##### ***3.3.2.1. Les Logiciels De Geoingenierie :***

###### **Microstation& Descartes**

Produit de la société Bentley, Microstation est avant tout un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO), et se situe par conséquent comme un des grands concurrents d'AutoCad. Cependant, plusieurs extensions ont été développées dans le but d'étendre ses possibilités au-delà du simple dessin vectoriel. Descartes (développé par HMR et distribué par Bentley) en est une et permet d'étendre les fonctions de Microstation à l'analyse et le traitement de fichiers raster.

##### ***3.3.2.2. Les Sig Experts :***

###### **ArcInfo**

ArcInfo est le produit phare de la société ESRI. Très puissant aussi bien au niveau base de données qu'au niveau analyse et traitement, ArcInfo est un logiciel très peu convivial et relativement compliqué à utiliser pour les personnes non expertes.

###### **MGE**

MGE sont les initiales de Modular GIS Environnement, ce qui précise tout de suite le type de logiciel. En effet, MGE travaille dans un environnement complètement modulaire sur la base de l'outil très puissant de DAO, Microstation. MGE (produit de la société Intergraph) et ArcInfo sont actuellement les logiciels les plus puissants et les plus performants sur le marché grâce aux différentes possibilités d'analyses qu'ils proposent. Cependant, ces importantes possibilités se paient par une forte complexité d'apprentissage et d'utilisation.

##### ***3.3.3.3. Les Sig De Bureau :***

###### **MapInfo& Vertical Mapper**

MapInfo est un outil simple et relativement puissant. Il permet l'analyse thématique et la visualisation de données sous forme de graphiques, de tables et de cartes. Dans sa version de base, MapInfo ne peut gérer que des données de type vecteur cependant, avec l'extension Vertical Mapper qui s'intègre totalement dans le logiciel, il permet également l'analyse et le traitement de données sous forme de grille (raster).

## **ArcView**

Produit par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute) conçu à la base pour visualiser les données provenant du très puissant logiciel ArcInfo, ArcView s'est beaucoup développé et propose actuellement bien plus que de simples fonctions de visualisation grâce à un environnement modulaire (près de 30 extensions sont disponibles). Il représente par conséquent un concurrent direct de MapInfo.

### **3.4. Choix de logiciel :**

Nous avons déjà vu que les SIG experts sont caractérisés par une grande complexité d'apprentissage et d'utilisation pour les personnes non experts, ce que nous a induit à utiliser un SIG de bureau puisque les SIG de bureau sont moins complexe que les SIG experts.

Nous avons choisi de travailler avec le logiciel ArcView, De fait que c'est est un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) complet permettant de visualiser, de gérer, de créer et d'analyser des données géographiques et vu la simplicité qu'offre ce type de logiciel par rapport aux autres types. A la différence d'Arc Info qui est conçu pour développer des données GIS, ArcView est conçu pour interagir avec des données GIS déjà existantes.

ArcView permet de mieux comprendre le contexte géographique des données, dévoilant ainsi des relations et des propriétés sous de nouveaux angles.

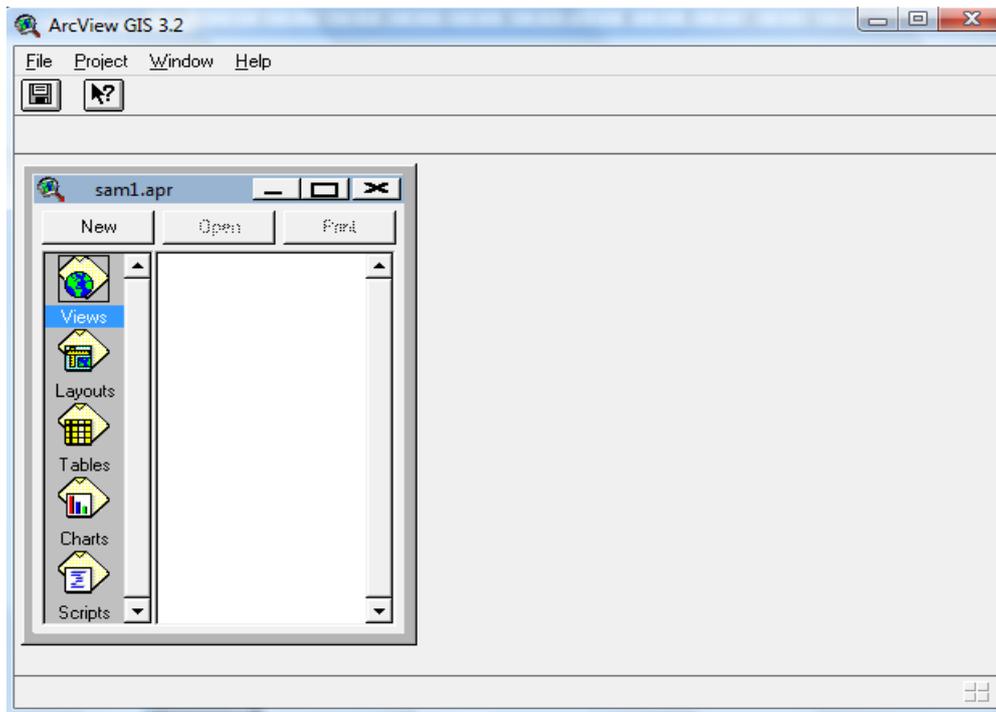
### **3.5. Présentation générale du logiciel ArcView :**

ArcView est un logiciel permettant de rassembler, gérer, analyser, combiner, élaborer et présenter des informations géographiques.

Pou cela, il est composé de 5 modules ayant chacun ses propres menus: (RAZAVI2001)

- **Vues (Views) :** Pour créer, visualiser, interroger et modifier des données géographiques sous forme de couches qui peuvent être superposées.
- **Tables :** Pour créer, visualiser, interroger et modifier des données descriptives sous forme de tables DBF.
- **Diagrammes (Charts) :** Pour présenter les données descriptives sous forme de diagrammes.
- **Mise En Page Et Restitution (Layouts) :** Pour restituer sous forme de dessins, prêt à être imprimés, des données géographiques et descriptives.
- **Script :** Nous permet d'écrire des programmes (des scripts) en langage orienté objet, AVENUE permettant d'automatiser des traitements de données géographiques.

Tous ses modules sont regroupés dans un module qu'on appelle "PROJECT" qui a aussi ses menus. Quand nous lançons ArcView nous avons cette fenêtre PROJECT:(RAZAVI1999)



**Figure 3.3 : Fenêtre de présentation d'un projet ArcView.**

Il suffit alors de choisir avec quel module nous voulons travailler.

### **3.6. Conclusion :**

Un Système d'Information Géographique (SIG) est une base de données, dont toutes les informations contiennent une référence géographique qui est déterminée par une paire de coordonnées spatiales. Les systèmes d'Information Géographique ont en commun les fonctionnalités suivantes : Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse.

Nous avons choisi de travailler avec le logiciel de bureau « ArcView » de la société ESRI (Environmental Systems Research Institute), De fait que les SIG du bureau offrent moins de complexité par rapport aux SIG experts et que c'est un logiciel SIG complet, qui interagi avec des données SIG déjà existante, ces données peuvent être de quatre types différents : les données raster, les données vecteurs, les données sans géométrie et les modèles numériques de terrain MNT.

Les données que nous allons utiliser dans le prochain chapitre sont sous forme de modèle numérique de terrain intégrant l'information de l'altitude qui est un paramètre indispensable dans notre étude. La question de la fiabilité des données se pose de manière cruciale, notre modèle numérique de terrain utilisé dans le prochain chapitre nous a été fourni par l'institut national de cartographie et de télédétection qui s'est résolument engagé depuis une décennie à mettre en place des moyens et des procédures techniques appropriées pour l'acquisition, le traitement et l'actualisation de la donnée géographique dans la perspective d'une meilleure prise en charge des besoins des utilisateurs sans cesse plus exigeants sur sa qualité, sa cohérence et son exhaustivité.

.Le Système d'Information Géographique (SIG) n'était qu'un moyen pour réaliser l'étude et non un objectif en soi.

ArcView aide des milliers d'organisations à prendre des décisions plus pertinentes et à résoudre des problèmes plus rapidement.

# **Chapitre 4**

## **Chapitre 4 : Application**

### **4.1. Introduction:**

Une pré étude de la couverture radar doit être effectuée avant toute installation de radar, pour participer à définir son cahier de charge. Nous étudierons dans cette partie la couverture des cinq radars secondaires de l'établissement nationale de la navigation aérienne installés à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued pour assurer un service de contrôle radar sur la partie nord de la FIR d' Alger.

Les systèmes d'informations géographiques sont appliqués pour estimer les effets de la topographie de terrain sur la propagation de l'onde radar (sur le rayonnement de l'antenne radar), et son impact sur la couverture radar au zones d'intérêt.

### **4.2. Présentation de projet TRAFCA:**

Un des objectifs affichés par le Plan National de la Navigation Aérienne ou PNNA lancé par L'établissement nationale de la navigation aérienne "ENNA" ex "ENESA" de l'année 1989 est d'accroître la capacité et les performances du système de navigation aérienne algérien Pour y parvenir le projet de traitement automatique des fonctions du contrôle aérien (TRAFCA) qui a été lancé en 1993 ayant les Objectifs suivants: (ENNA2010)

- améliorer la sécurité de la circulation aérienne.
- augmenter la capacité de gestion du trafic aérien.
- fournir des outils afin d'assister le contrôleur et d'augmenter la capacité des secteurs.
- alléger le volume de travail du contrôleur en prenant en charge les tâches fastidieuses.
- assurer l'intégrité des données.
- visualisation intelligente des données de trafic aérien.
- réduire la charge des canaux vocaux.
- prévoir et réguler le trafic aérien.

Ce projet est constitué de deux parties:

La partie SYRAL (Système Radar Algérien) pour la partie "Radar", Cette partie comprend principalement la couverture radar de la partie Nord et des Hauts Plateaux de la région d'information de vol d'Alger (FIR), par l'acquisition et la mise en service de cinq stations radar secondaires. Ces dernières seront installées à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued, à noter que la station d'Alger comporte un radar primaire complanté avec le secondaire.

La partie SAACTA(Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic Aérien) pour la partie "Système" cette partie comprend également l'équipement et la mise en œuvre d'un centre de qualification pour les besoins de perfectionnement et de recyclage pour le personnel technique de la navigation Aérienne, Cette partie du projet TRAFCA a porté sur :

1. l'acquisition, l'installation et la mise en service d'équipements pour les besoins du Centre de Contrôle Régional d'Alger (ainsi que des approches des aérodromes d'Alger, d'Oran, d'Annaba et de Constantine) constitués de systèmes de traitement de données Radar corrélées avec les données plan de vol, des pupitres d'exploitation, de systèmes de gestion des communications téléphonie de radio) et des systèmes d'enregistrement de données et de replay.

2. la mise en œuvre de l'ADS dans la partie sud de la FIR Alger (dans une seconde phase)

3. la réalisation d'un CQRENA (Centre de Qualification, de Recyclage et d'Expérimentation de la Navigation Aérienne) doté d'équipements pédagogiques : simulateurs de contrôle de trafic aérien pour l'aérodrome et pour le contrôle en route, des laboratoires techniques, un système de développement software. Ce centre permettra en outre, de qualifier le personnel technique chargé de l'exploitation du système TRAFCA ainsi que sa maintenance.

Le système automatique algérien de contrôle du trafic aérien (SAACTA) se compose de cinq (05) stations radar, d'un système de traitement de données radar et d'un système de traitement de données plan de vol (FDP).

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des différentes stations.  
(AIP 2010)

Nom de la station	Type de radar	site	Coordonnées géographiques
Oued Smar	Primaire/ secondaire	Alger	364037N 0031050E
Seraidji	secondaire	Annaba	365444N 0074107E
Murdjadjou	secondaire	Oran	354147N 0004618W
Bouderga	secondaire	El Bayadh	333735N 0010433E
Guemmar	secondaire	El Oued	33047N 0064650E

Le système radar décrit ci-dessus est destiné à fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar de route dans les trois secteurs du nord de la FIR Alger (TMA Centre Alger, TMA Nord Est et TMA ORAN) et le service radar d'approche en zone terminale de l'aérodrome d'Alger.

Le système de contrôle du trafic aérien (ATC) peut utiliser le radar primaire de

surveillance et le radar secondaire de surveillance seuls ou en combinaison pour assurer les services de contrôle de la circulation aérienne. (AIP2010)

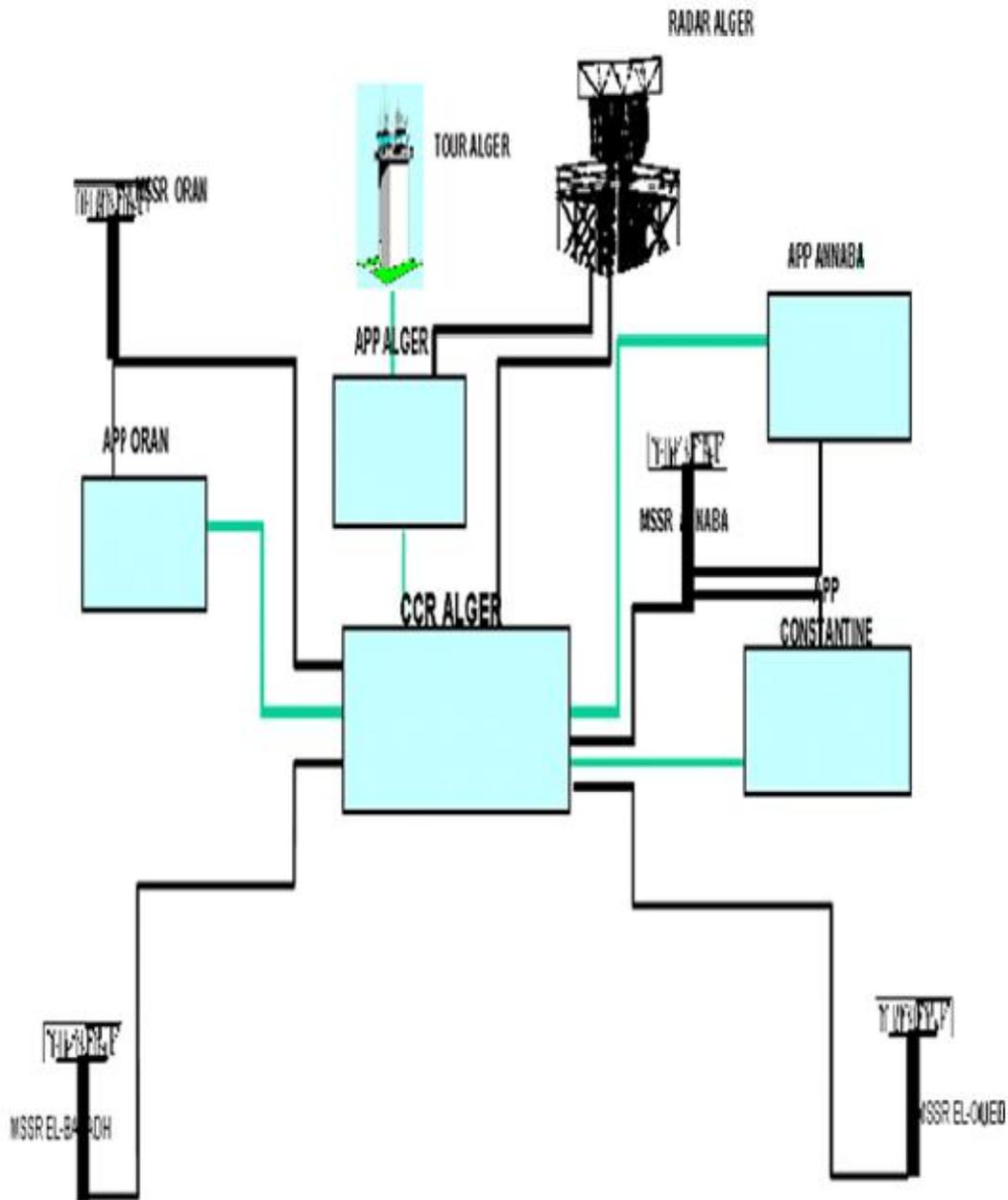


Figure 4.1 : Schéma simplifié des installations radar de projet TRAFCA.

### 4.3. Sectorisation de l'espace aérien:

En salle de contrôle, les Contrôleurs de la circulation aérienne disposent d'écrans graphiques couleurs pour visualiser les trajectoires des aéronefs en représentation plane.

Une trajectoire est matérialisée par un symbole placé sur la position actuelle et par des



#### 4.4. Établissement de la couverture RADAR:

L'organigramme suivant décrit les étapes suivies pour établir la couverture radar en utilisant le logiciel ARC VIEW:

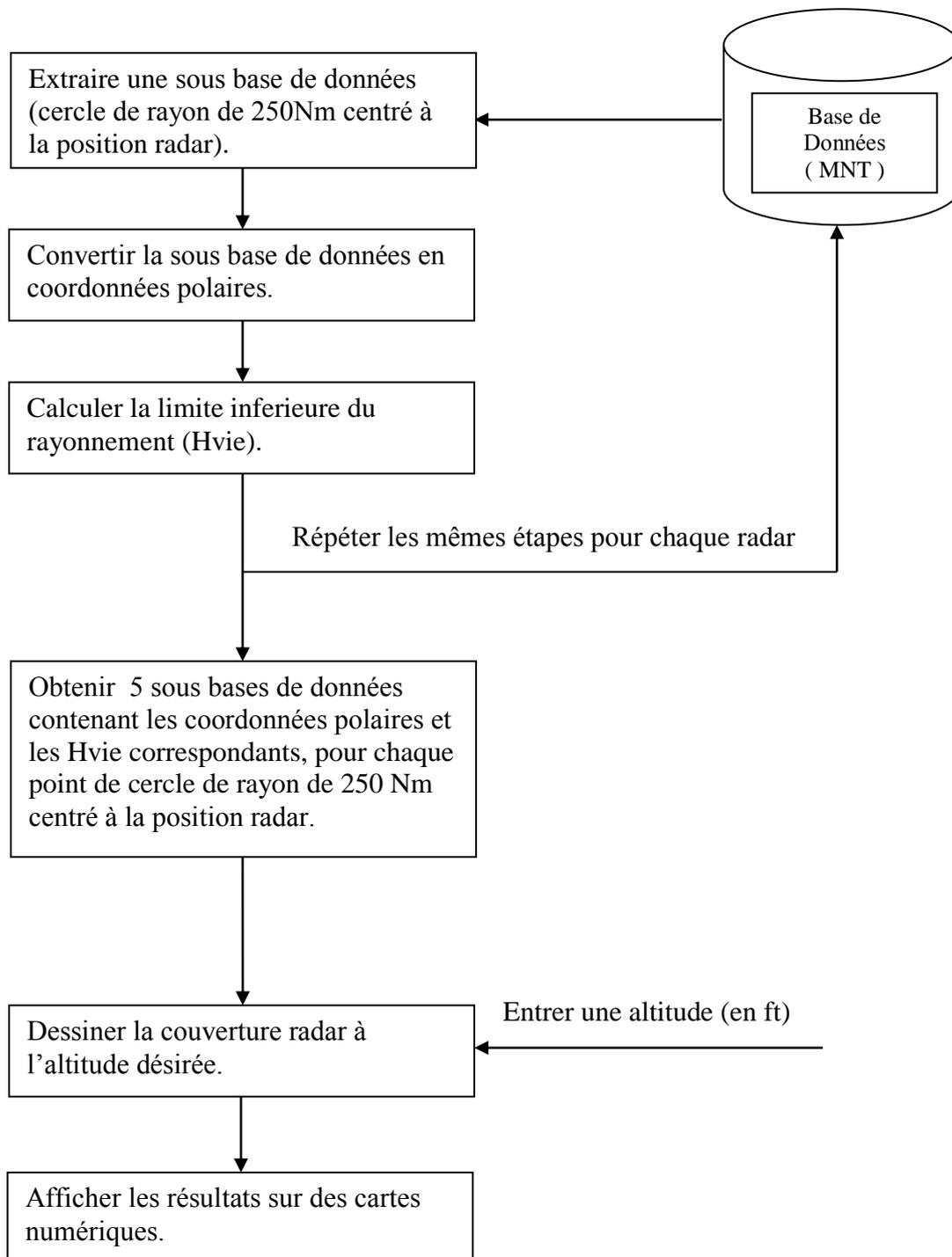


Figure 4.3 : Les étapes de détermination de la couverture radar.

1- utilisation d'une base de données sous forme du modèle numérique de terrain englobant une partie du territoire comprise entre les latitudes 31 N et 37 N et entre les longitudes 3W et 9E, cette base de données est d'une extension ASCII.

```

ncols      14401
nrows      7201
xllcorner  -3.00041667
yllcorner  30.99958333
cellsize   0.000833333333333333
NODATA_value -9999

829.0 844.5 862.0 879.0 896.0 913.5 931.0 948.5 965.5 980.5 988
994.0 996.0 998.0 1000.0 1002.0 1004.0 1003.0 999.0 994.5 990.0
977.5 972.5 968.0 966.0 970.0 978.0 985.0 992.0 999.5 1007.0 10
1028.5 1033.0 1034.5 1036.0 1038.0 1040.0 1041.5 1043.0 1045.0
1033.0 1018.5 1004.0 990.0 975.5 960.5 946.0 931.5 918.0 912.5
919.5 921.0 923.0 925.0 926.5 930.0 938.0 947.0 956.0 965.0 973
1000.5 1008.5 1013.5 1016.5 1019.0 1021.0 1023.5 1026.0 1028.0

```

**Figure 4.4 : Format du modèle numérique de terrain (MNT).**

La structure de cette base de données est la suivante:

ncols: nombre de colonnes de la matrice qui est 14401.

nrows: nombre de lignes de la matrice qui est 7201.

xllcorner: la longitude de premier point de la matrice qui est 3,00041667W.

yllcorner: la latitude de premier point de la matrice qui est 30,99958333N.

cellsize: la résolution de la base de données, qui est égale à 0,000833333 arc degré qui est égale à 92,596296m.

NODATA value: la valeur -9999 est allouée aux points où la hauteur n'est pas déterminée.

```

829.0 844.5 862.0 879.0 896.0 913.5 931.0 948.5 965.5 980.5 988
994.0 996.0 998.0 1000.0 1002.0 1004.0 1003.0 999.0 994.5 990.0
977.5 972.5 968.0 966.0 970.0 978.0 985.0 992.0 999.5 1007.0 10
1028.5 1033.0 1034.5 1036.0 1038.0 1040.0 1041.5 1043.0 1045.0
1033.0 1018.5 1004.0 990.0 975.5 960.5 946.0 931.5 918.0 912.5
919.5 921.0 923.0 925.0 926.5 930.0 938.0 947.0 956.0 965.0 973
1000.5 1008.5 1013.5 1016.5 1019.0 1021.0 1023.5 1026.0 1028.0

```

Cette matrice contient les altitudes par rapport au niveau de la mer des points compris entre les latitudes 31 N et 37 N et entre les longitudes 3W et 9E.

2- établir des tables contenant les positions géographiques et les élévations de terrain correspondant à chaque point situé à l'intérieur d'un cercle de rayon de 250NM autour de chaque position radar.

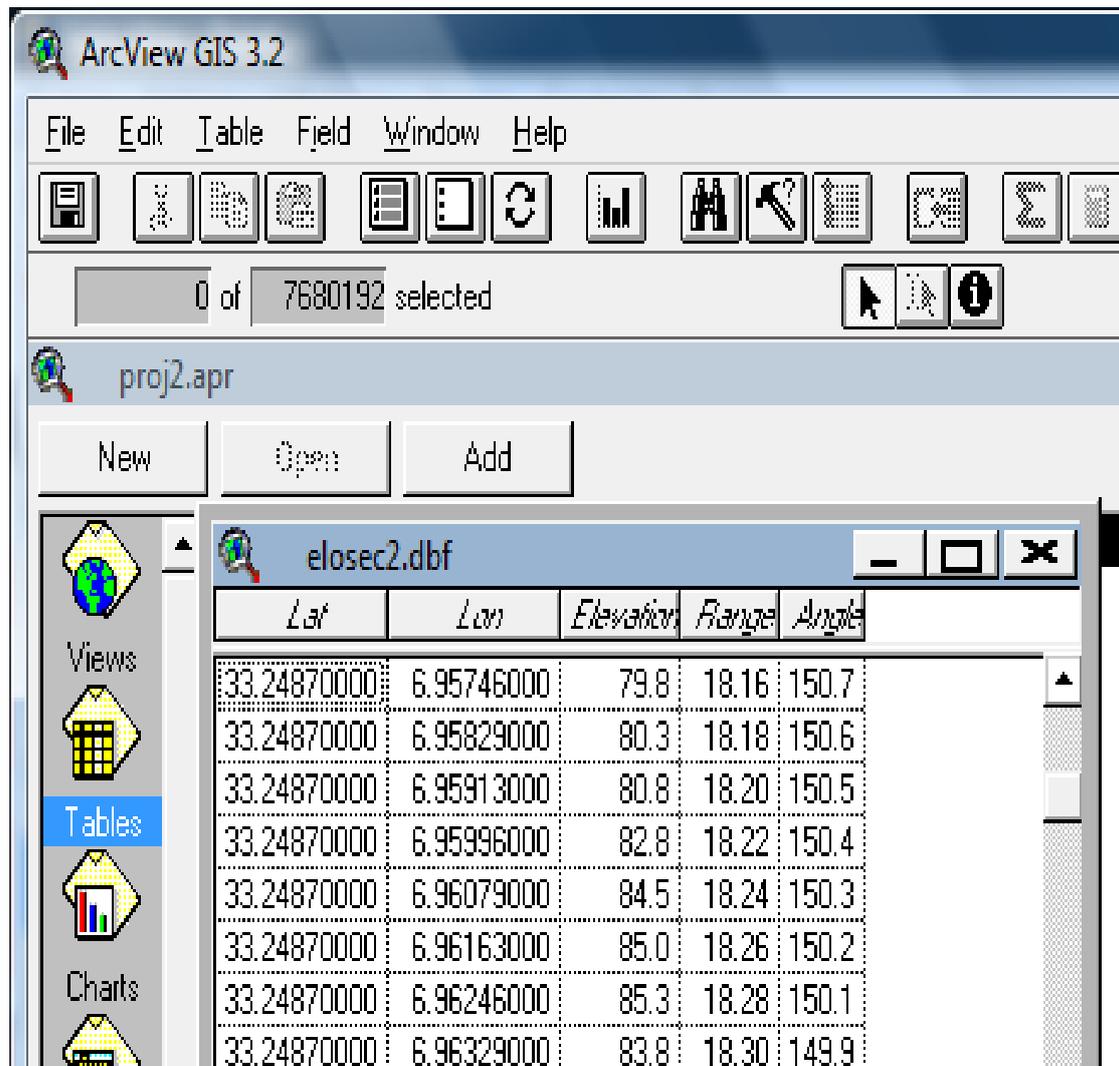
Vu le nombre de points très élevé dans un cercle de rayon de 250NM autour de radar, nous avons présenté ses points dans quatre tables, chacune contient un quart de cercle.

The screenshot shows the ArcView GIS 3.2 interface. The main window displays a data table for 'elosec2.dbf'. The table has three columns: 'Lat', 'Lon', and 'Elevation'. The data is as follows:

Lat	Lon	Elevation
33.51290000	6.78079000	57.5
33.51290000	6.78163000	57.8
33.51290000	6.78246000	59.8
33.51290000	6.78329000	59.8
33.51290000	6.78413000	57.5
33.51290000	6.78496000	58.0
33.51290000	6.78579000	61.0
33.51290000	6.78663000	62.8

Figure 4.5 : Table de données de secteur 2 autour de radar d'EL Oued (elosec2).

3- calculer les coordonnées polaires de chaque point de chaque table par rapport à la position du radar correspondant.



The screenshot shows the ArcView GIS 3.2 interface. The main window displays a data table for 'elosec2.dbf'. The table has five columns: *Lat*, *Lon*, *Elevation*, *Range*, and *Angle*. The data rows show coordinates and values for eight points. The interface also shows a menu bar (File, Edit, Table, Field, Window, Help), a toolbar with various GIS tools, and a status bar indicating '0 of 7680192 selected'.

<i>Lat</i>	<i>Lon</i>	<i>Elevation</i>	<i>Range</i>	<i>Angle</i>
33.24870000	6.95746000	79.8	18.16	150.7
33.24870000	6.95829000	80.3	18.18	150.6
33.24870000	6.95913000	80.8	18.20	150.5
33.24870000	6.95996000	82.8	18.22	150.4
33.24870000	6.96079000	84.5	18.24	150.3
33.24870000	6.96163000	85.0	18.26	150.2
33.24870000	6.96246000	85.3	18.28	150.1
33.24870000	6.96329000	83.8	18.30	149.9

Figure 4.6 : Table de données en coordonnées polaires d'elosec2.

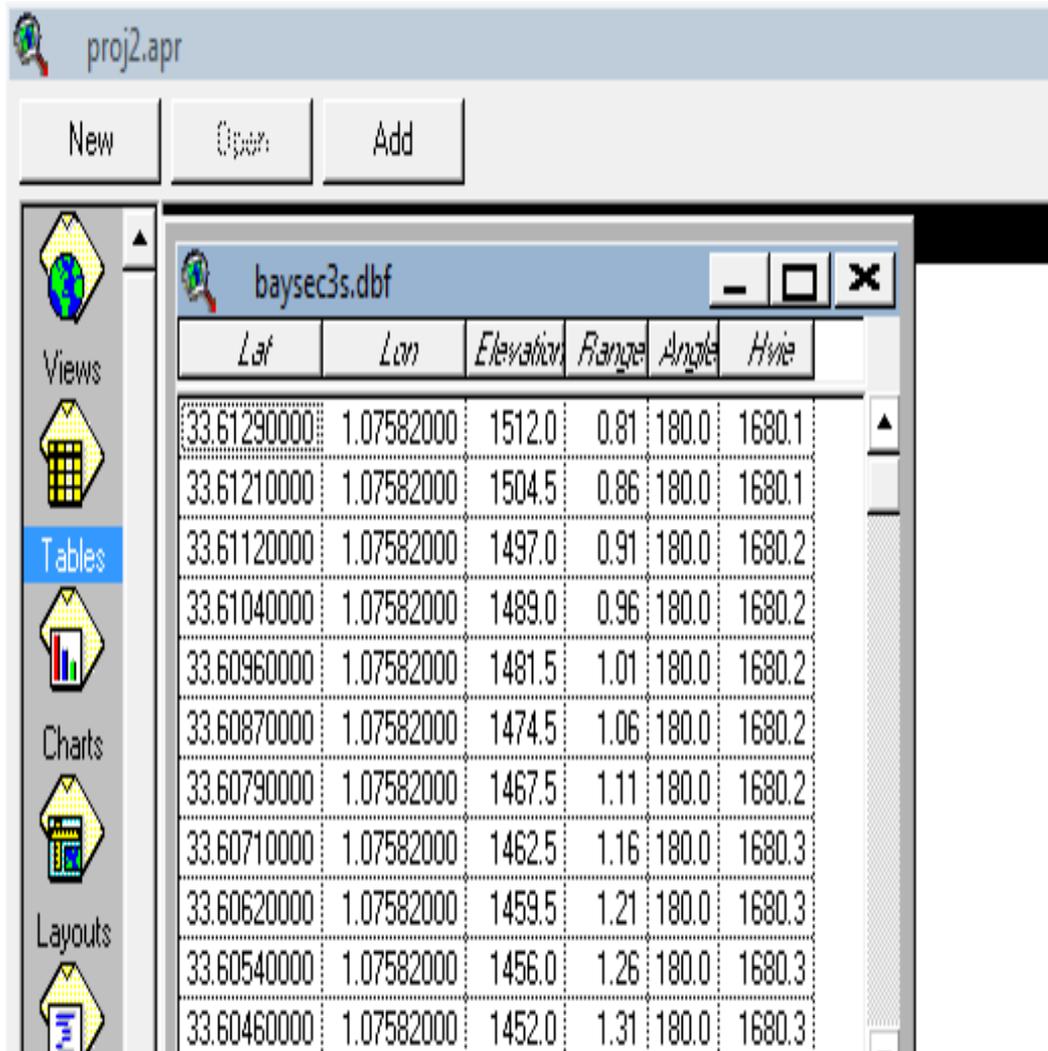
4- ranger chaque table dans un sens ascendant par rapport à l'angle et en suite par rapport au rayon.

<i>Lat</i>	<i>Lon</i>	<i>Elevation</i>	<i>Range</i>	<i>Angle</i>	<i>A</i>
35.62540000	4.34080000	427.8	249.99	92.0	▲
35.62370000	4.34080000	427.0	249.99	92.0	
35.62290000	4.34080000	427.0	249.99	92.0	
35.62040000	4.34080000	429.3	250.00	92.0	
35.62210000	4.34080000	427.5	250.00	92.0	
35.62120000	4.34080000	428.5	250.00	92.0	
35.69540000	-0.73917600	449.0	1.59	92.1	
35.69540000	-0.73834200	447.0	1.63	92.1	
35.69460000	-0.71250900	377.0	2.89	92.1	
35.69460000	-0.71167600	376.0	2.93	92.1	
35.69460000	-0.71084200	375.0	2.97	92.1	▼

Figure 4.7 : Table de données en coordonnées polaires rangée d'ornsec2.

5- calculer la hauteur de la base de rayonnement radar.

Nous désignons par  $H_{vie}$ , la hauteur de la base de rayonnement radar en un point.



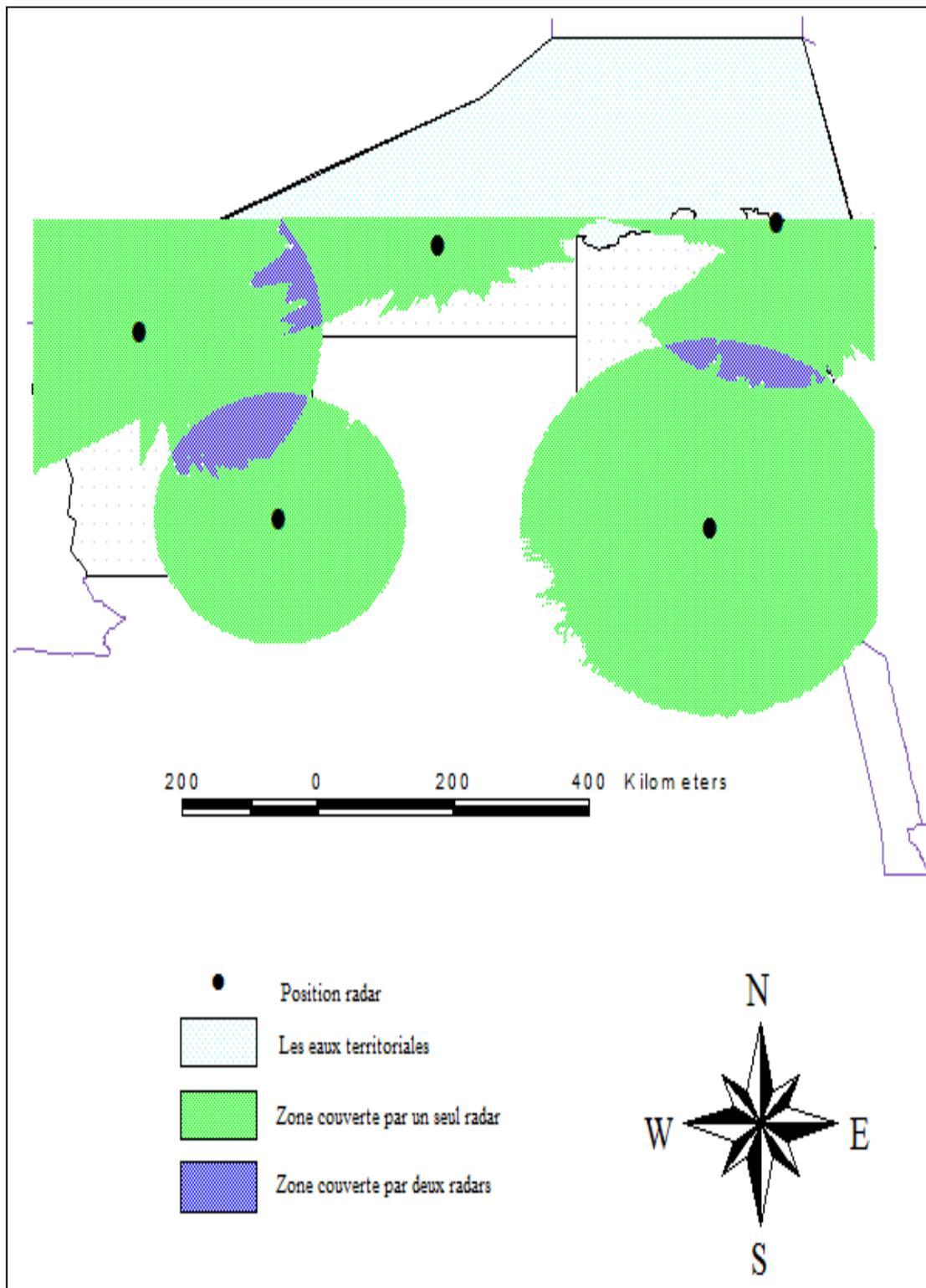
<i>Lat</i>	<i>Lon</i>	<i>Elevation</i>	<i>Range</i>	<i>Angle</i>	<i>Hvie</i>
33.61290000	1.07582000	1512.0	0.81	180.0	1680.1
33.61210000	1.07582000	1504.5	0.86	180.0	1680.1
33.61120000	1.07582000	1497.0	0.91	180.0	1680.2
33.61040000	1.07582000	1489.0	0.96	180.0	1680.2
33.60960000	1.07582000	1481.5	1.01	180.0	1680.2
33.60870000	1.07582000	1474.5	1.06	180.0	1680.2
33.60790000	1.07582000	1467.5	1.11	180.0	1680.2
33.60710000	1.07582000	1462.5	1.16	180.0	1680.3
33.60620000	1.07582000	1459.5	1.21	180.0	1680.3
33.60540000	1.07582000	1456.0	1.26	180.0	1680.3
33.60460000	1.07582000	1452.0	1.31	180.0	1680.3

**Figure 4.8** : Table de donnée en coordonnées polaires rangées et les  $H_{vie}$  correspondants.

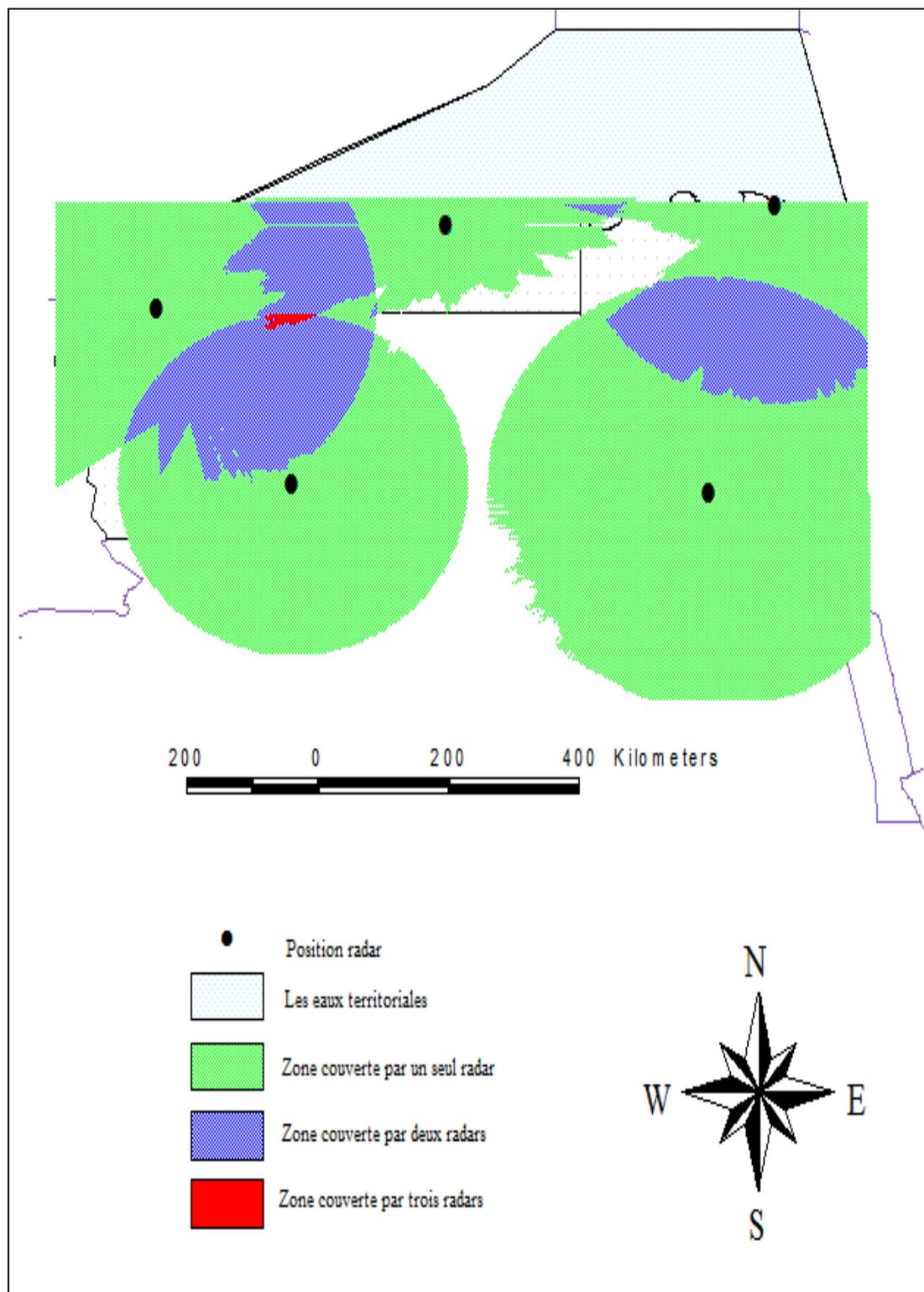
6- tracer la couverture radar à différentes altitudes:

La hauteur  $H$  ( $H_{vie}$ ) est croissante en fonction de  $D$  et de  $\alpha(0^\circ > \alpha > 90^\circ)$ . Pour une altitude donnée "A" à laquelle nous voulons déterminer la couverture radar, la portée max du radar dans un azimut correspond à la distance  $D$  à la quelle  $H_{vie}$  est égale ou juste inférieure à l'altitude A.

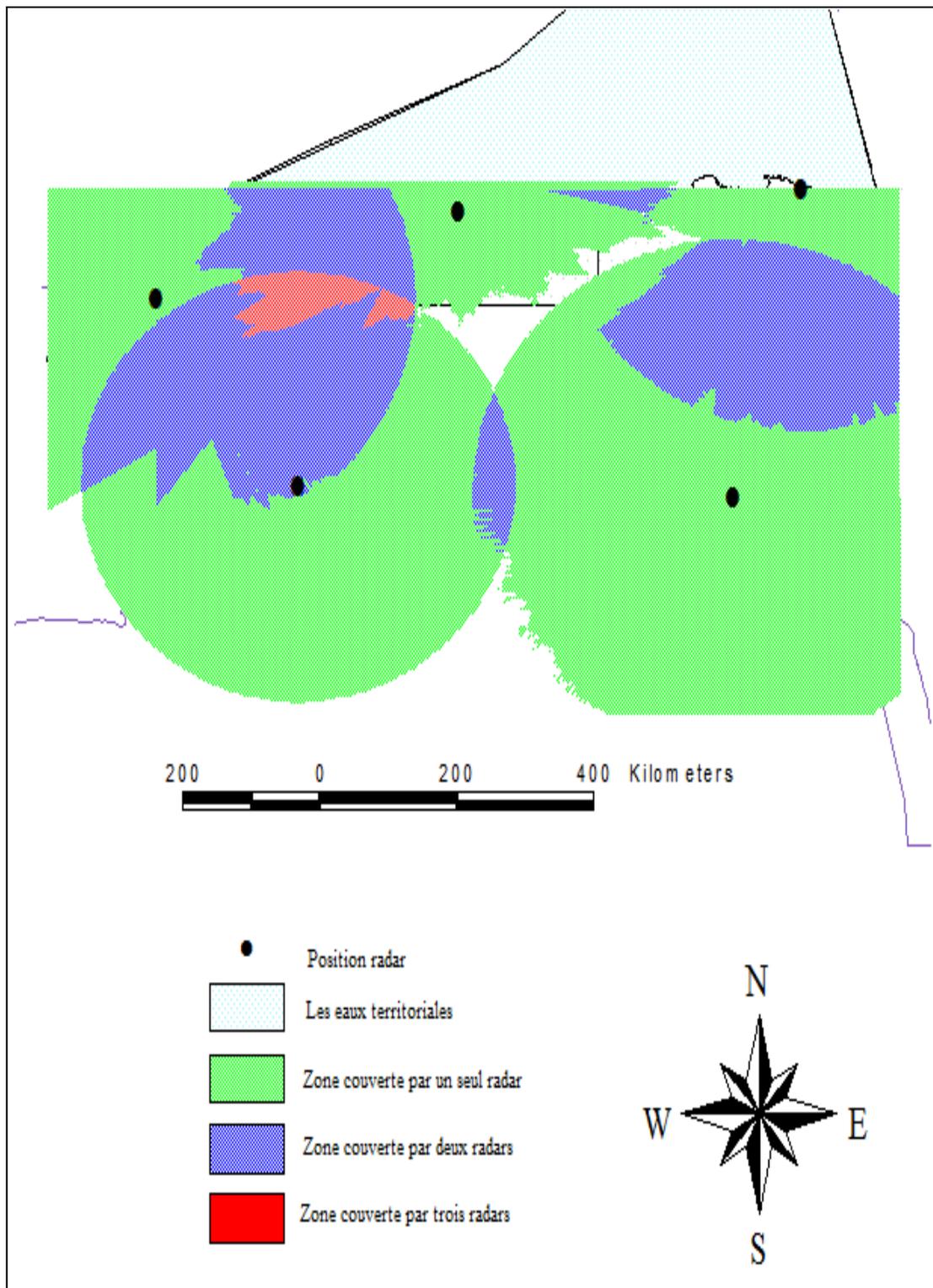
Au fait, pour chaque angle d'azimut nous comparons la hauteur de la base du rayonnement ( $H_{vie}$ ) avec l'altitude A (A: en pied (ft)). Ainsi nous trouvons la portée max du radar dans chaque azimut (direction) et nous traçons la couverture de chaque radar séparément sur le plan horizontal situé à l'altitude A.



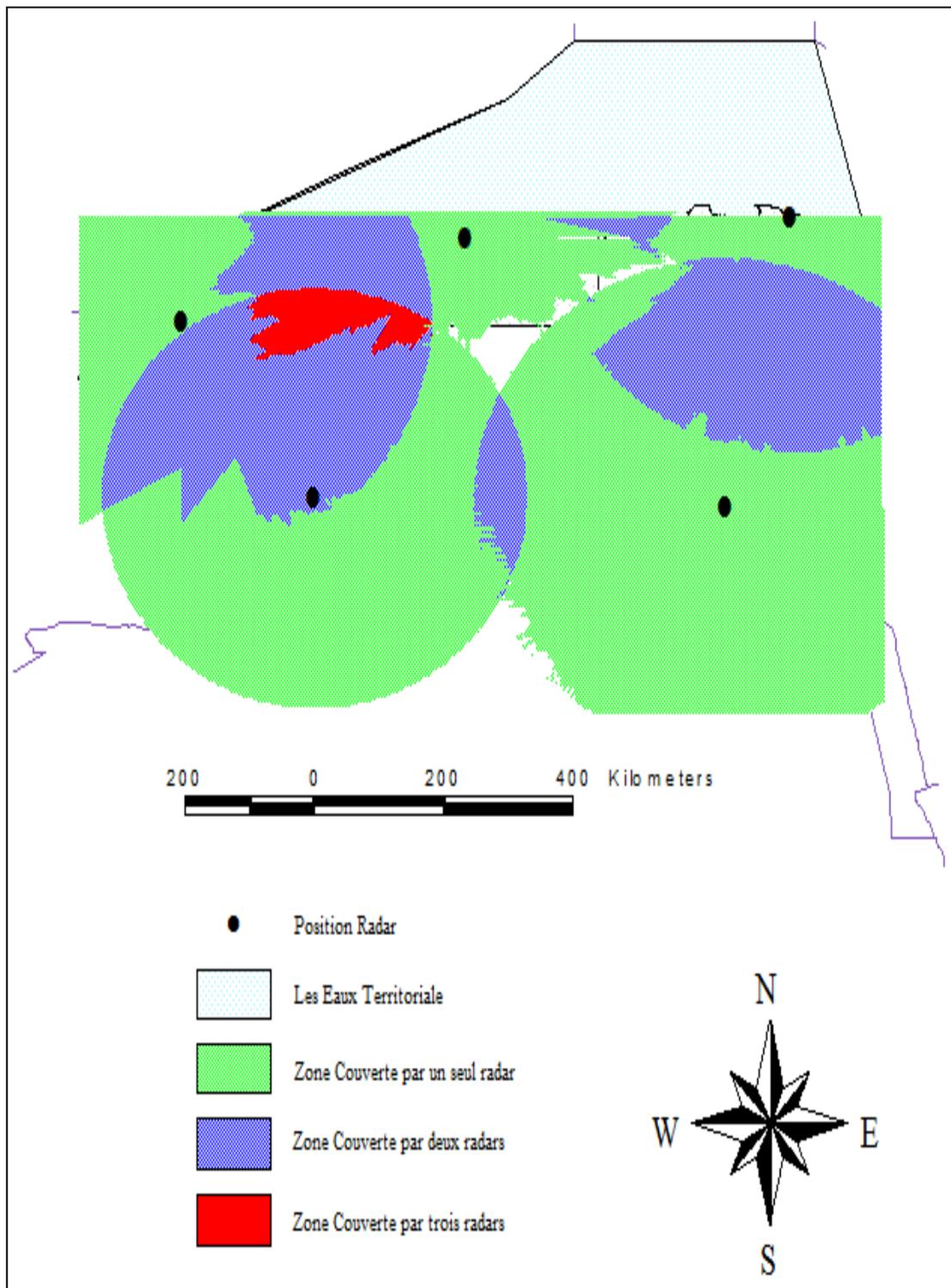
**Figure 4.9 : La description des zones de couverture radar à 11 000ft.**



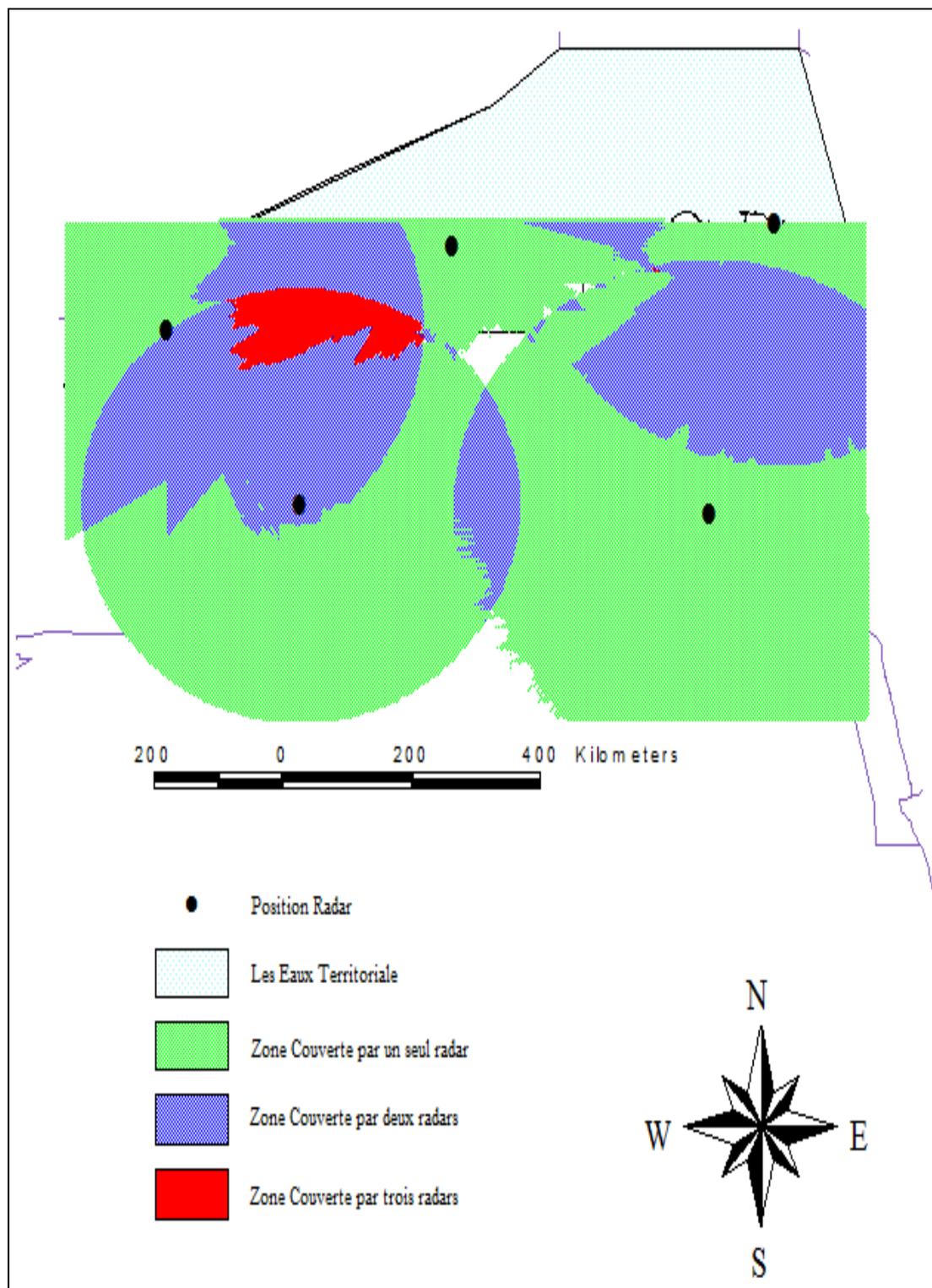
**Figure 4.10 : La description des zones de couverture radar à 16000ft.**



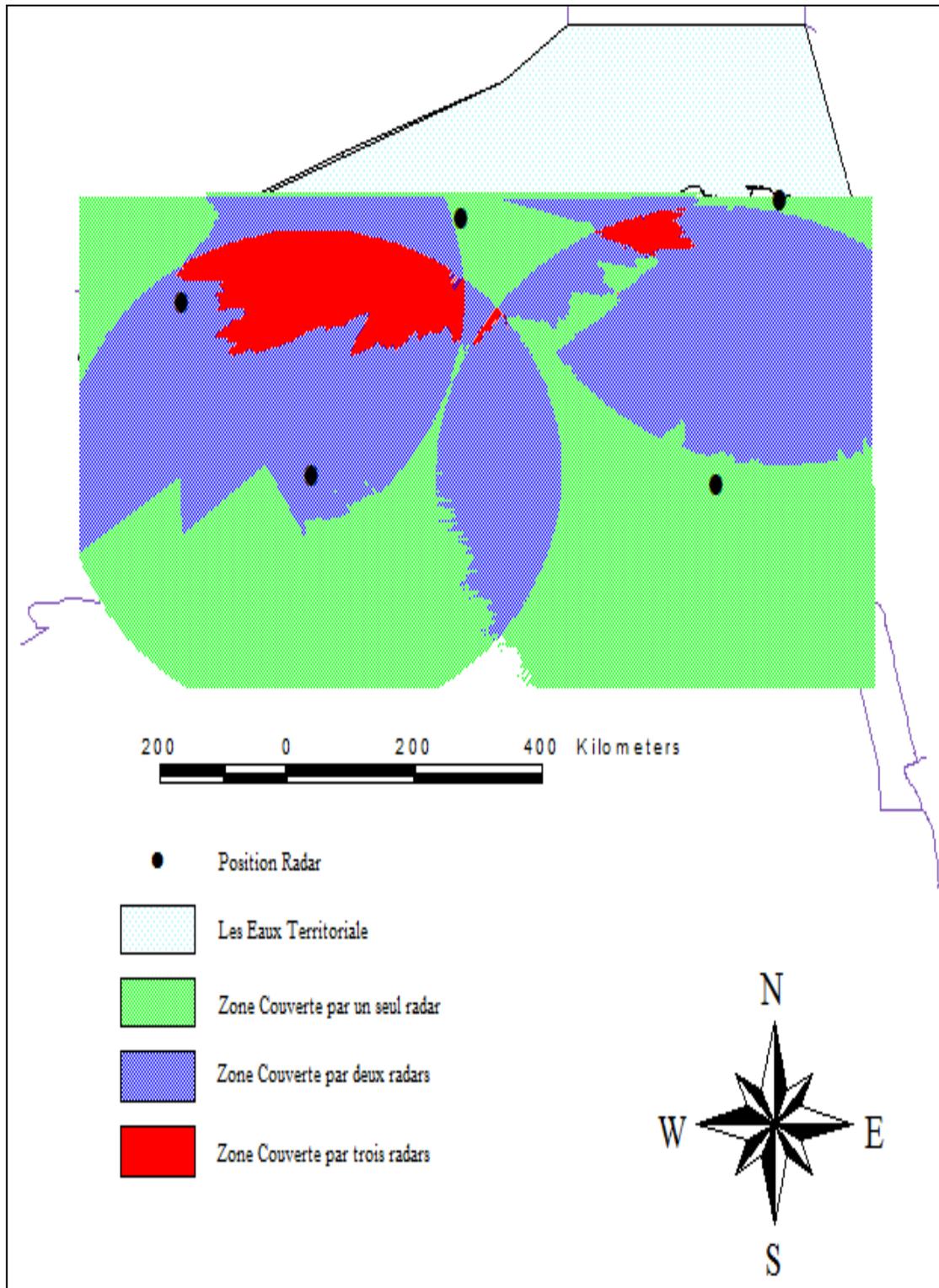
**Figure 4.11 : La description des zones de couverture radar à 20 000ft.**



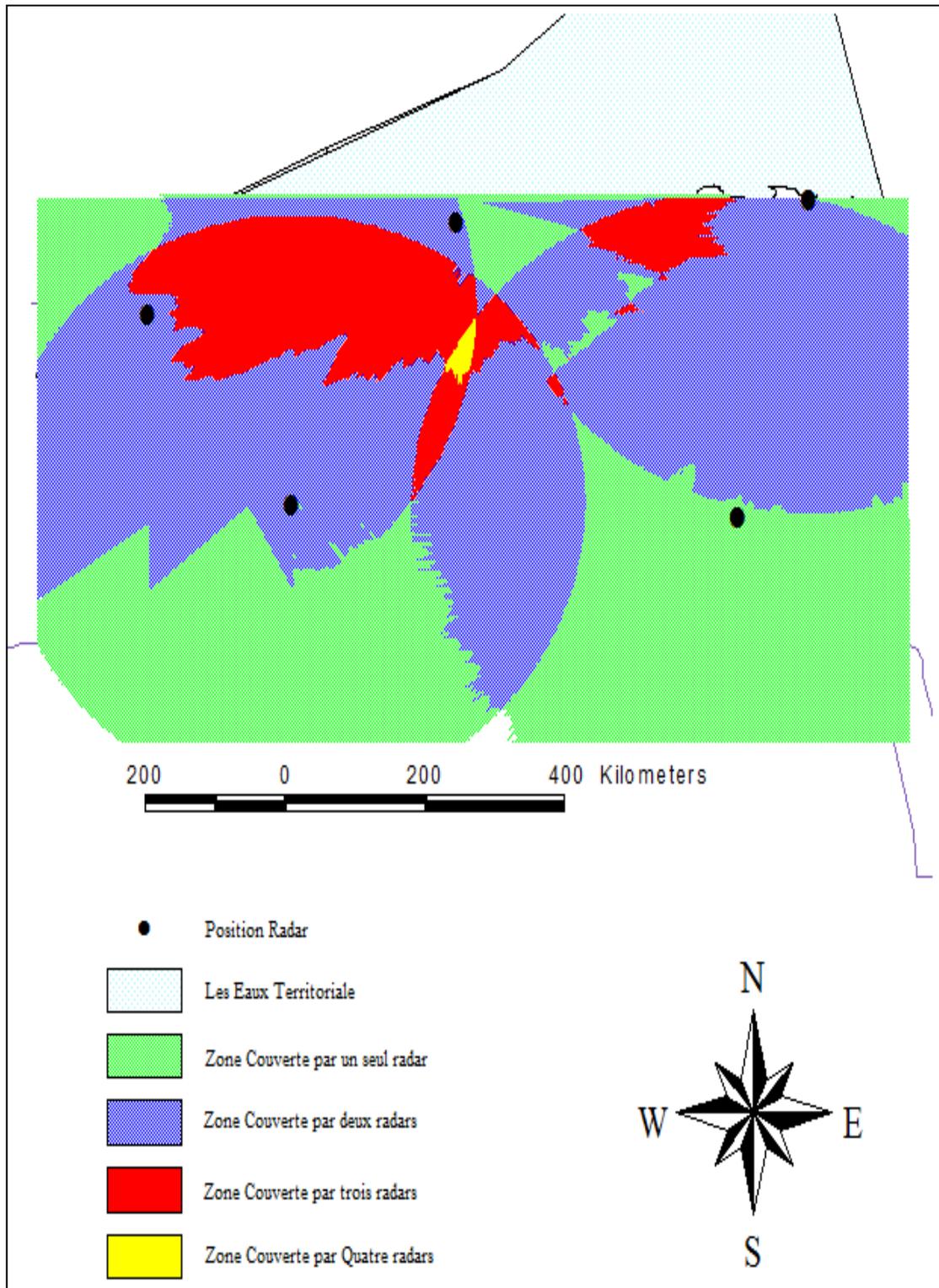
**Figure 4.12 : La description des zones de couverture radar à 21 000ft.**



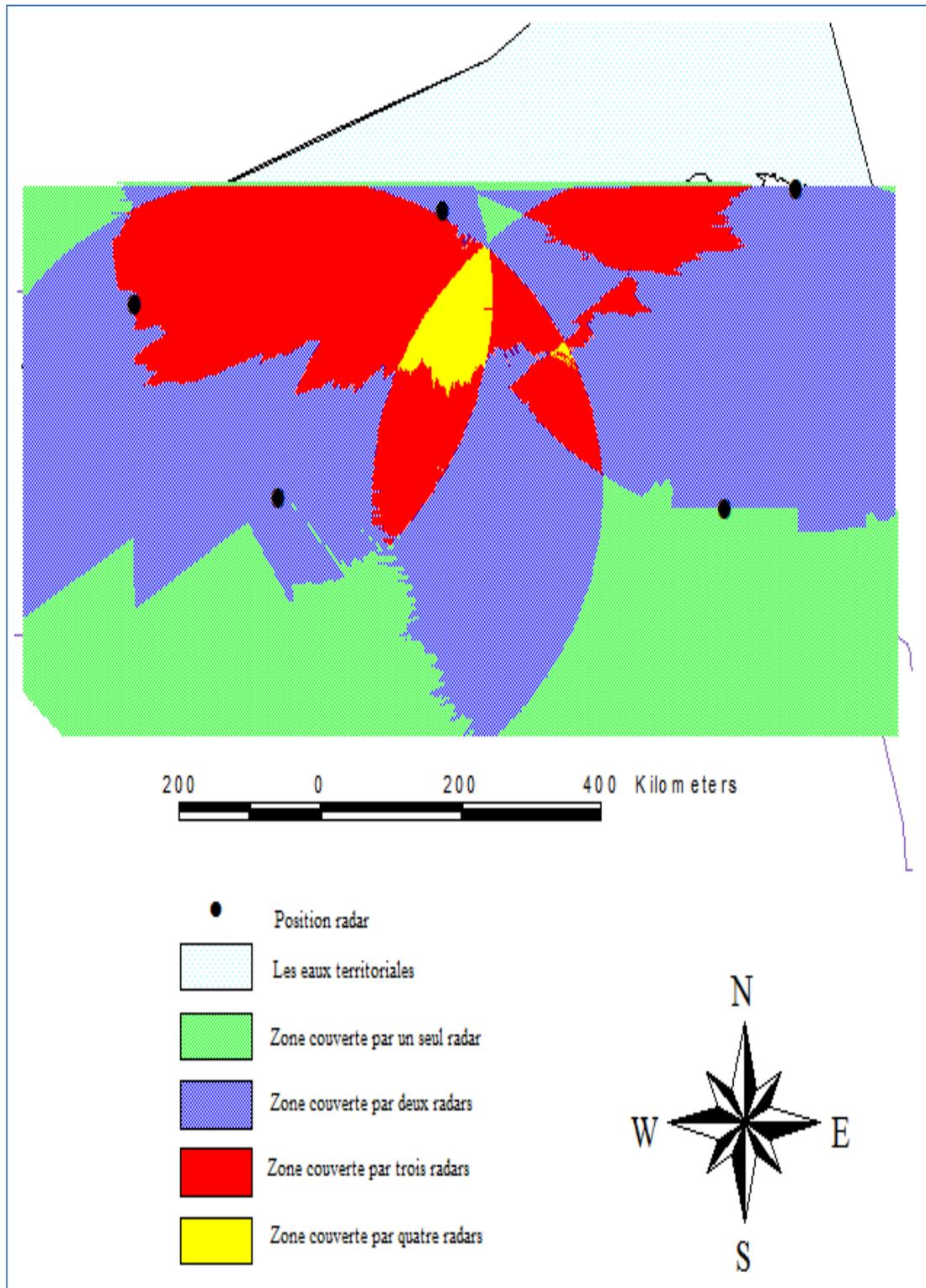
**Figure 4.13 : La description des zones de couverture radar à 22 000ft.**



**Figure 4.14 : La description des zones de couverture radar à 27 000ft.**



**Figure 4.15 : La description des zones de couverture radar à 30 000ft.**



**Figure 4.16 : La description des zones de couverture radar à 35 000ft.**

#### 4.5. Les relèvements sur sites:

Nous prenons comme exemple le radar d'Alger, ci-dessous nous avons un échantillon de trafics identifiés ; soit par leur numéro de ligne (DAH6202 : Air Algérie 6201) soit par leur immatriculation (7TWRB) soit par leur code transpondeur (0062). Nous avons relevé les distances, les radiales et les altitudes correspondantes à chaque trafic et en dernier les altitudes calculées par notre algorithme.

Identification de trafic	Radial(°)	Distance(Nm)	Reference	Altitude relevée(ft)	Altitude calculée(ft)
DAH 6201	140	62	ALG	17 000	16 038
DAH 6032	107	87	ALG	19 000	18 249
IDENT 3243	107	71	ALG	14 000	14 177
DTH1803	140	69	ALG	19 000	18 138
ZSNAC	141	83	ALG	23 000	23 263
7TWRB	161	51	ALG	17 000	16 461
ZSNAC	139	86	ALG	23 000	22 832
7TWNB	140	85	ALG	24 000	23 199
IDENT 5262	149	107	ALG	34 000	34 463
DAH 6665	123	90	ALG	24 000	23 866
IDENT 4261	100	87	ALG	14 000	13 953
DAH6186	98	124	ALG	18 000	18 250
IDENT 0062	88	99	ALG	13 000	12 014
IDENT 4135	144	67	ALG	19 000	19 406

DAH : le code IATA (international aviation transport association) de la compagnie nationale AIR ALGERIE.

DTH : le code IATA (international aviation transport association) de la compagnie nationale TASSILI AIRLINES.

ZSNAC : Immatriculation OACI du trafic.

5262 : Exemple de trafic identifié par son code transpondeur (trafic non corrélé).

## 4.6. Interprétations des résultats et comparaison avec les relèvements:

Les tracés de la couverture radar à différents niveaux, nous ont permis de localiser les zones de non couverture radar (zones de silence), ce qui nécessite de déployer d'autres moyens de détection.

Nous remarquons qu'il y a une mauvaise couverture radars en basses altitudes cela est dû à l'existence de reliefs qui bloquent une grande partie du rayonnement radar, dans la partie nord de la FIR d'Alger (les trois TMA) nous citons ci-dessous les différents reliefs qui ont affecté les rayonnements des cinq radars :

- Radar d'Alger: affecté par de nombreux obstacles de l'est par les hauteurs de la Kabylie (Azib Belkacem 930m, Sid Ali Bouneb) et la région de Beni Amrane, au sud par Chelall et la chaîne de Chérea et à l'ouest par les montagnes de Dahra.
- Radar d'Annaba: principalement affecté à l'ouest d'Annaba par la chaîne de montagnes située entre Skikda et Jijel.
- Radar d'El Oued: peu affecté par l'élévation des terres on se rapprochant de Ghardaia par l'ouest.
- Radar d'Oran: affecté au sud par les montagnes au sud de Tlemcen, à savoir les hauteurs de Ouled Mimoun, Sidi Sebdou et Khemis.
- Radar d'El Bayed: n'a pas été affecté de fait qu'il a été installé dans les hauteurs de l'Atlas Saharien (Ouled Cheikh à 1869m par rapport au niveau de la mer).

C'est à partir de 22 000 ft d'altitude, que nous commençons à avoir une couverture radar presque totale des trois TMA et en atteignant les 27 000ft d'altitude la couverture radar devient totale sur les trois TMA. Nous avons aussi constaté et déterminé des zones couvertes par deux et jusqu'à quatre radars en même temps.

Un écart en altitude d'environ 1000ft (328m) maximum a été constaté entre les relèvements et les altitudes calculées à partir du modèle adopté. Cela est dû d'une part au modèle approximatif (atmosphère claire, gradient d'indice de réfraction constant, rayon fictif de la terre), d'autre part aux erreurs commises lors de la prise des relèvements sur l'écran radar aussi les erreurs sur le modèle numérique de terrain utilisé.

## 4.7. Conclusion

La couverture radar d'une station dans un espace aérien dégagé de tout obstacle est normalement un cercle de rayon D, ce rayon doit être supérieur à 250 Nm, et conformément à l'annexe 10 volume 5 de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). En réalité, cette couverture est affectée par les reliefs de terrain. La portée limitée des radars donne lieu à des zones non couvertes où le trafic n'est détecté par aucun radar, ce qui nécessite un choix de site qui favorise une couverture plus au moins complète de l'espace souhaité.

L'utilisation des systèmes d'informations géographiques sous forme de model numérique de terrain (MNT) nous a permis de manipuler des données géographiques, d'élaborer la couverture des cinq radars à n'importe quelle altitude et de la présenter sur des cartes afin d'analyser cette couverture radar et prendre des décisions des moyens à déployer pour étendre la couverture radar.

## CONCLUSION GENERALE

L'utilisation du radar permet une meilleure précision dans la séparation en vol mais aussi la détection précoce des conflits et les écarts de la part des pilotes. La couverture radar permet aussi de réduire les manœuvres d'approche et favorise des arrivées directes pour augmenter la capacité de trafic.

La portée limitée des radars donne lieu à des zones non couvertes où le trafic n'est détecté par aucun radar. Certaines parties de l'espace aérien sont sans couverture radar, notamment en raison de la topographie. Un trafic qui pénètre dans une zone sans couverture radar disparaît de l'écran du contrôleur aérien ce qui oblige le contrôleur aérien de passer au contrôle aux procédures.

Notre étude nous a permis de constater que la couverture de radar d'Alger n'est pas à la hauteur des objectifs visés, de faite que les parties sud et est de la TMA Alger ne sont pas couvertes, Aussi le rayonnement de radar d'Alger aurait été plus étendu si le radar d'Alger était placé dans les hauteurs de Chéréa, et se servir de radar primaire en basses altitudes dans la région d'approche d'Alger.

Une grande partie de rayonnement du radar d'Annaba est bloqué par les reliefs au nord de Constantine, nous pourrions avoir un espace couvert plus important dans la TMA Est si ce radar était placé au environ de Constantine ce qui permet d'avoir une couverture plus étendu jusqu'à la partie Est de la TMA Alger.

Le radar d'El Oued offre une bonne couverture, de faite qu'il n'est pas entouré de reliefs donc il couvre bien la zone qu'il desserve, mais ça aurait été plus intéressant s'il était placé au nord ouest de sa position actuelle pour couvrir la partie sud est de la TMA Alger et la partie sud ouest de la TMA Est.

Le radar d'Oran couvre une grande partie de la TMA Oran, la présence de reliefs au sud de la position de radar d'Oran a donné lieu à une non couverture de l'extrême sud de la TMA Oran.

La région d'El Bayed est connue par ses hauteurs, le radar d'El Bayed est placé au sommet des hauteurs des montagnes de Sidi Cheikh', c'est pour cela que la portée maximum de ce radar apparait sur les tracés inférieure à celles de tous les autres radars.

Il est facile à imaginer que les pays montagneux comme la Suisse sont plus soumis à ce problème de couverture et font souvent appel à un certain nombre de petits radars mobiles, en plus de leurs radars fixes, pour combler les zones non couvertes.

La couverture radar devrait être améliorée pour avoir un espace aérien sous contrôle radar sur toute la FIR d'Alger. L'extension de la couverture radar peut être assurée en utilisant une nouvelle technologie de surveillance de la circulation aérienne connue sous le nom de multilatération (MLAT) à couverture étendue (WAM) pour combler les zones non couvertes par les radars.

La MLAT est une méthode de détection de la position par triangulation à l'aide d'au moins trois récepteurs au sol captant les signaux émis par le transpondeur d'un aéronef. Les

informations délivrées par ce système seront envoyées aux systèmes de traitement des données radar et plan de vol. Elle offre une surveillance semblable à la couverture radar et permet aux contrôleurs de la circulation aérienne d'assurer le suivi des aéronefs et d'offrir des services de circulation aérienne efficaces.

La MLAT présente au contrôleur un affichage exact de la circulation dans l'espace aérien. Les contrôleurs terminaux pourront appliquer dans un espace aérien non radar les mêmes normes d'espacement aux aéronefs avec transpondeurs embarqués. Par ailleurs, le système de multilatération pourra être installé aux aéroports; il s'ajoutera au système de surveillance de surface par radar ou bien il pourra être utilisé tout seul. Des transpondeurs installés à bord des véhicules contribueront à donner aux contrôleurs aériens l'image complète des mouvements de surface. Pour la surveillance des mouvements de surface.

Les contrôleurs pourront mieux positionner un aéronef dans une circulation souvent complexe de vols commerciaux et récréatifs, en particulier à basse altitude.

La MLAT apportera également un autre niveau de sécurité pour les services consultatifs et d'information aux aéronefs

Prenant l'exemple de NAV CANADA qui a obtenu de Transports Canada une exemption réglementaire En juillet 2010, lui permettant d'utiliser la MLAT pour toutes les applications du radar secondaire de surveillance.

La MLAT est plus efficace dans certaines situations tel que la surveillance aux endroits où la topographie rendrait impossible l'utilisation du radar ou bien difficile et coûteuse contrairement au MLAT qui utilise du matériel à circuits intégrés facilement installés sur les toits d'édifices ou les tours d'antenne.

La MLAT est unique de faite qu'elle peut décoder les signaux de transpondeur traditionnel aussi bien que les transmissions ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-mode B), ce qui permet une éventuelle mise à niveau des systèmes. Et en la comparant au radar secondaire, elle fournit une plus grande précision sur la position, un taux de mise à jour plus rapide, meilleure couverture et fiabilité.

Nous pouvons dire que la MLAT comble parfaitement les besoins particuliers en surveillance d'aujourd'hui et de demain.

Les systèmes d'information géographiques sont devenus très performants grâce aux progrès effectués sur les logiciels et sur les matériels. Les systèmes d'information géographiques n'étaient qu'un moyen pour réaliser l'étude et non un objectif en soi. Ils permettent de traiter rapidement et efficacement des volumes importants de données et souvent en temps réel. La mise à disposition de données à jour concourt à faciliter la mise en œuvre d'applications utilisant l'Information Géographique et permet d'assurer des résultats de qualité. Son utilisation nous a conduits à la prise de conscience de la nécessité d'avoir recours à de tels systèmes.

## **BIBLIOGRAPHIE**

BARTON, David K. Radar System Analysis and Modeling. Artech House Publishers, 2004. 566 p.

BENTEJAC, René. Technique du radar classique-prolongements actuels. Masson, 2007. 260 p.

BLANCHARD, Yves. Le Radar 1904-2004 : Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles. Ellipses Marketing, 2004. 432 p.

BOITHIAS, Lucien. Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Dunod, 1983. 309 p.

BROOKNER, Eli. Radar technology. Artech House on Demand, 1977. 420 p.

BRUNNER, F.K. Geodetic Refraction : Effects of Electromagnetic wave Propagation Through the Atmosphere. Springer, 1984. 213 p

Cadoret, Louis. Technique radar appliqué : tome 2 : 1ere édition. Toulouse. Ecole nationale de l'aviation civile, 1984. 87 p

COLIN, Jean-Marie. Le radar théorie et pratique. Ellipses, 2002. 160 p.

MARMONIER, P. L'information géographique. Support de cours de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques, 2002. 11 p.

PICON, Odile. LES ANTENNES : théorie, conception et application. DUNOD, 2009 .372p

PORNON, Henri. SIG : La dimension géographique du système d'information. DONOD, 2011. 271p.

RAZAVI , Amir H. ArcView/Avenue Programmer's Reference: Class Hierarchy Quick Reference and 101 Scripts. OnWord Press, 1995. 446 p.

RAZAVI , Amir H. Arcview Gis/Avenue Scripts. OnWord Press, 1999.

RAZAVI , Amir H. Arcview Developer's Guide. OnWord Press, 2001. 400 p.

SKOLNIK, Merrill I. Introduction to Radar systems. McGraw-Hill Higher Education, 2002. 672 p.

SKOLNIK, Merrill I. Radar handbook. McGraw-Hill Professional, 2008. 1328 p.

STEVENS, Michael C. Secondary surveillance radar. Artech House, 1988. 300 p.

THOUREL, Léo . Initiation aux techniques modernes des radars. Cepadues, 1982. 301 p.

THOUREL, Léo . Les radars de veille modernes. Masson, 1965. 282p.

VIOLET, André. Radiogoniométrie Radar Radioguidage. École supérieure d'électricité, 1953. 648 p.

Etablissement nationale de la navigation aérienne. Projet *TRAFCA* (Automatisation des fonctions du contrôle aérien). [en ligne]. [Consulté le 8 Mars 2010].

Disponible sur < <http://www.enna.dz>>

WOLF Christian. Les principes du radar. [en ligne]. [Consulté le 2 janvier 2011].

Disponible sur <<http://www.radartutorial.eu>>

Documentation aéronautique :

Aeronautical Information Publication. Algérie. Le Manuel sur CD ROM, 2010.

Annexe 10: Télécommunication aéronautique, Volume 4, Systèmes radar de surveillance et systèmes anticollision. Organisation de l'aviation civile internationale. Quatrième édition. Le Manuel sur CD ROM, 2007.

DOC 9684: Manuel sur les systèmes de radar secondaire de surveillance, SSR. Organisation de l'aviation civile internationale. Deuxième. Le Manuel sur CD ROM, 1999.

DOC 4444 : Règles de l'air et service de la circulation arienne. Quatorzième édition. Le Manuel sur CD ROM, 2001.