

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

# **Mémoire de fin d'études**

**Présenté en vue de l'obtention  
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique**

**Option : Communication**

***Thème :***

***Etude d'un radar à ouverture synthétique  
Application à la cartographie 2D***

**Proposé et dirigé par :**

**Mr : TAZIBT.S**

**Présenté par :**

**Mr : MEZIANE Abderrezak**

**Mr : BENZEDANE Amar**

**Année universitaire 2008/2009**

**Soutenu le : 0/10/2009**

# REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Mr S.TAZIBT pour avoir voulu être notre encadreur, pour sa bienveillance attention et surtout disponibilité.

Nous témoignons notre particulière reconnaissance à Monsieur Y. AIT Boudia et H. AIT OUAZOU pour leur aide précieuse, qui a grandement contribué au développement de cette thèse sans oublier les gentils qui travaillent à la bibliothèque.

Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de juger ce travail.

Enfin, à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin, nous leur adressons nos sincères remerciements.



# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I : GENERALITES

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1-Définition d'un radar .....                                  | 1  |
| 2-Principe du radar .....                                      | 1  |
| 2-1-Principe de base ... ..                                    | 1  |
| 3-Mesure de la distance .....                                  | 3  |
| 4-Détermination de la direction .....                          | 4  |
| 4-1-Angle d'azimut.....                                        |    |
| 4-2-Angle de site .....                                        | 5  |
| 5-Calcul de la vitesse .....                                   | 6  |
| 6-Équation générale du radar .....                             | 9  |
| 6-1-Formule générale .....                                     | 9  |
| 6-2-Formule simplifiée .....                                   | 10 |
| 7-Fréquences radar .....                                       | 11 |
| 8-Classification des systèmes radars .....                     | 13 |
| 8-1-Classification selon la forme de l'onde utilisée.....      | 14 |
| 8-2-Classification selon le mode d'exploitation de l'espace... | 19 |

### CHAPITRE II : PRINCIPE ET DESCRIPTIONS DU SAR

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 1-Principe du radar à ouverture synthétique ..... | 25 |
| 2-Compartiment du SAR .....                       | 28 |

## INTRODUCTION GENERALE :

Dans ces trente dernières années, l'utilisation de données satellitaires et les applications de télédétection est devenue de plus en plus populaire au sein des chercheurs. Sans nul doute, les avancées technologiques ont été marquées par le développement de systèmes d'acquisition actifs. Ces derniers constituent une réponse au désir sans cesse plus important de mieux connaître notre environnement, au plus près, et plus précisément les différentes matières qui le constituent : la géomorphologie.

L'imagerie radar SAR (Synthetic Aperture Radar) présente un intérêt particulier de ce type de thématiques car ses performances sont indépendantes des conditions météorologiques (propriétés des ondes électromagnétiques), à la différence des images optiques, et aussi à la possibilité d'échantillonner la surface terrestre avec une grande précision.

L'utilisation actuelle du SAR couvre aussi bien le domaine civil (géologie, hydrographie, agriculture, cartographie, suivie des étendues des glaciers) que le domaine militaire (reconnaissance et désignation de cibles, surveillance des zones de combat etc.)

L'intérêt de ce type de radar réside dans le fait que les fréquences utilisées sont peu affectées par les phénomènes atmosphériques. En effet, la propagation est peu affectée par les nuages, ce qui offre un grand intérêt pour les systèmes à observation aérienne ou aéroportée (embarqués sur un avion). De plus le SAR est un système qui possède sa propre source d'illumination.

Le travail est élaboré afin de mettre en œuvre les connaissances théoriques et les applications pratiques à la compréhension du fonctionnement du système SAR. Ses principes se résument en l'émission des impulsions et le traitement des échos diffusés afin d'en extraire l'information souhaitée qu'est l'image.

# CHAPITRE I

## Généralités

## I.1-DEFINITION DUN RADAR :

Le RADAR dont l'acronyme est (Radio Detction And Ranging) est un dispositif qui sert à la détection et à la localisation des objets (en mouvement ou fixe), il possède des capacités d'exploitation de jour comme de nuit. L'une des caractéristiques clés du radar est de surveiller une zone étendue (détection) et sa capacité de reconnaissance et acquisition de d'objectif.

En principe il existe deux grandes familles de radar à savoir :

Radars a ondes continues et les radars a impulsion dont fait partie le **SAR** (synthetique aperture radar : radar à ouverture synthétique) qui fait l'objet de notre travail.

## I.2 -PRINCIPE DU RADAR :

### I.2.1-Principe de base :

Le principe utilisé par le radar est similaire à celui de la réflexion des ondes sonores, à l'image d'un vol de la chauve souris. Par exemple dans le cas d'un radar à impulsion ce dernier utilise des impulsions électromagnétiques (signal hyperfréquence) qui se propage dans l'espace en générale à ligne droite et à vitesse constante. Ces derniers sont en fonction de l'indice de réfraction  $n(w)$  qui dépend des conditions météorologiques.

Le signal hyperfréquence est émis en direction de la cible. Une partie de cette énergie est réémise par la cible dans la direction du radar, cette énergie renvoyée par la cible est appelée **Echo**. On utilise ce dernier afin de déterminer la **direction** et la **distance** de l'objet réflecteur.

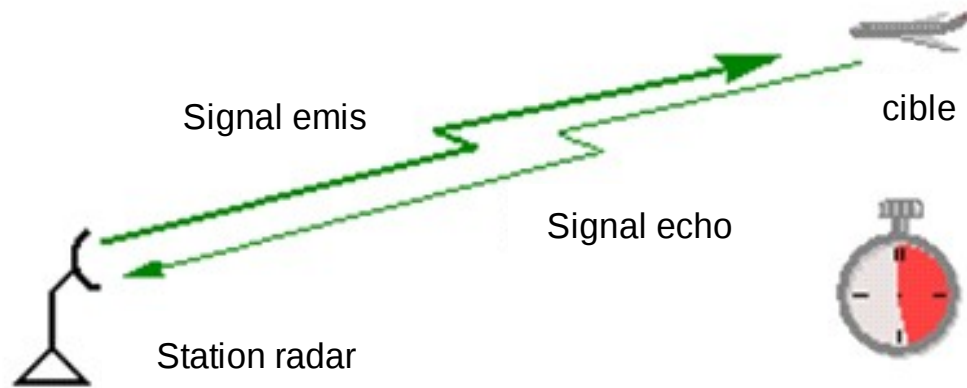


**Figure I.1: Principe du radar**

**NB :** Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'air approximativement à la vitesse de la lumière dans le vide :  $3 \cdot 10^8$  m/s soit 162000 milles nautique par seconde.

### **I.3- MESURE DE LA DISTANCE : [1], [3]**

Lors de localisation de cibles (mobiles ou fixes), La distance est calculée à partir de la mesure du temps nécessaire d'une impulsion radioélectrique émise, se propage à la vitesse de la lumière pour effectuer un aller-retour entre le radar et la cible.

Pour se faire on utilise la formule (I-1).

$$2D = C_0 * T \quad \Rightarrow$$

$$D = \frac{1}{2} C_0 * T \quad (I-1)$$

Ou :

$C_0$  : est la vitesse de la lumière dans le vide, à savoir  $3 \cdot 10^8$  m/s.

**T** : est le temps mesuré (aller-retour) en seconde [s]

**D** : est la distance recherchée mesurée en [m]

#### **I-4)-DETERMINATION DE LA DIRECTION :**

La mesure unique de la distance est insuffisante pour localiser les cibles. Il est donc généralement nécessaire de connaître les deux autres paramètres à savoir (azimut, angle de site).

##### **I.4.1- AZIMUT :**

De par sa définition, l'azimut est la direction du nord géographique et celle de la cible ; il est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. Cette dernière est liée à la capacité de l'antenne à concentrer de l'énergie rayonnée dans une direction particulière. Par exemple une antenne a forte directivité est appelé ***antenne directive***.

En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la directivité de l'antenne. Pour une fréquence émise donnée (ou une longueur d'onde définie), la directivité d'une l'antenne est en fonction de ses dimensions propres.

L'azimut, figure-I.2-, se mesure dans le plan horizontal de la cible. La position exacte du nord géographique doit être connue. Par conséquent les équipements les plus anciens nécessitaient l'emploi d'une boussole ou l'aide de quelques calculs trigonométriques.

Les radars modernes assurent directement cette tâche et, grâce au **GPS**, qui leur fournit une information extrêmement fiable concernant la direction du nord.

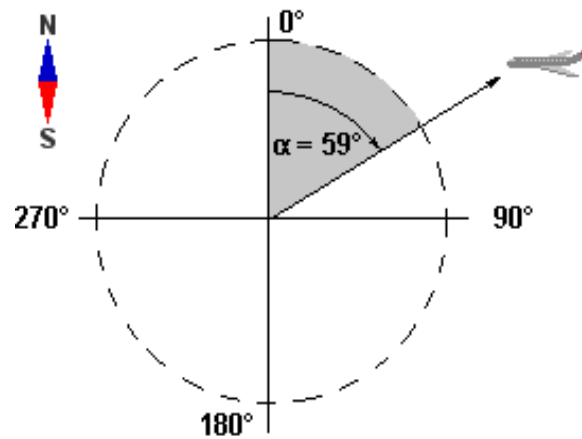


**Figure I-2: azimuth de la cible.**

Les antennes de la plupart des radars sont étudiées et réalisées de façon à rayonner l'énergie dans une direction donnée sous la forme d'un faisceau directionnel appelé (**lobe principale**) par exemple, pour un radar à balayage, c'est la direction du lobe principale qui fournit l'information relative à l'azimut. A cause de la forme du lobe rayonné, la puissance du signal réfléchi varie au fur et à mesure de l'éclairage de la cible par le lobe.

Le signal reçu est maximal suivant l'axe du lobe principale et diminue à mesure que l'angle entre l'axe du lobe et la cible s'y écarte.

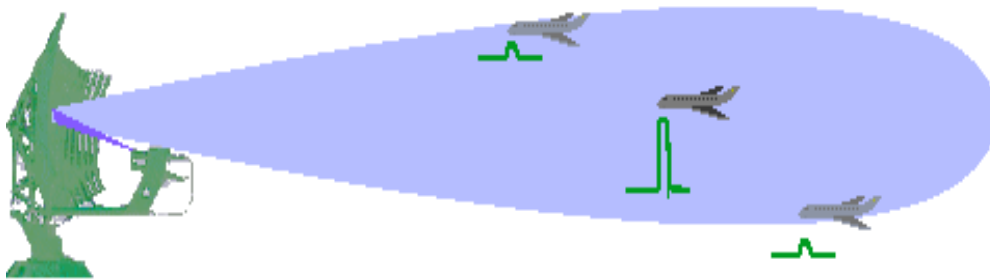


**Figure I-3 : azimuth de la cible.**

#### **I.4.2- ANGLE DE SITE : [1]**

Le site est un angle que forme le plan horizontal du radar et l'axe radar-cible. Dans le cas des radars d'altimétrie le faisceau (ou lobe) rayonné est très étroit dans le plan vertical. Ce faisceau se déplace suivant un axe vertical (mécaniquement ou électroniquement), afin de balayer en site son volume de détection et d'y positionner les cibles.

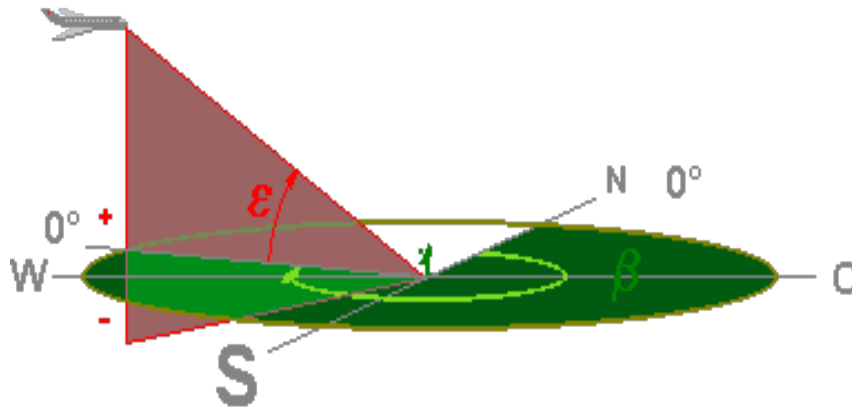


**Figure I-4 : Angle de site**

Ou désigne par  $\epsilon$  l'angle de site. Qui est positif lorsqu'il est au-dessus de l'horizon (site  $0^\circ$ ), et négatif en dessous.

### **I.5- CALCULE DE LA VITESSE : [2], [3], [7] : E 6650]**

Un autre paramètre mesurable par les radars, sous certaines conditions, est la vitesse radiale ou vitesse de rapprochement des cibles détecté, qui se manifeste à travers l'effet DOPPLER.

#### **a-L'EFFET DOPPLER :**

Cet effet fut découvert par un physicien autrichien, **Christian Doppler** au 19<sup>ème</sup> siècle. En 1842 il publia un article décrivant ce phénomène et trois ans plus tard une expérience confirma sa théorie.

#### **Explication du phénomène :**

C'est un effet que l'on rencontre tous les jours. Par exemple, on pourra expliquer grâce à cet effet pourquoi la sirène d'une ambulance paraît plus aigue lorsqu'elle s'approche d'un observateur et plus grave si elle s'éloigne de lui.

#### **Hypothèse :**

Cette différence de sonorité serait due à la vitesse de l'ambulance qui influencerait sur la propagation des ondes sonores. Ce phénomène est applicable à tous les régimes vibratoires quelles que soient leurs natures.

#### **Analyse de l'effet :**

Soit la figure -I.5-: un mobile (avion) situé a l'instant origine a une distance  $D_0$  du radar et qui s'approche avec une vitesse radiale  $V_r$ .

Le temps de parcours de l'onde est :

$$T = \frac{2D}{c} = \frac{2D_0}{c} - \frac{2V_r}{c} t$$

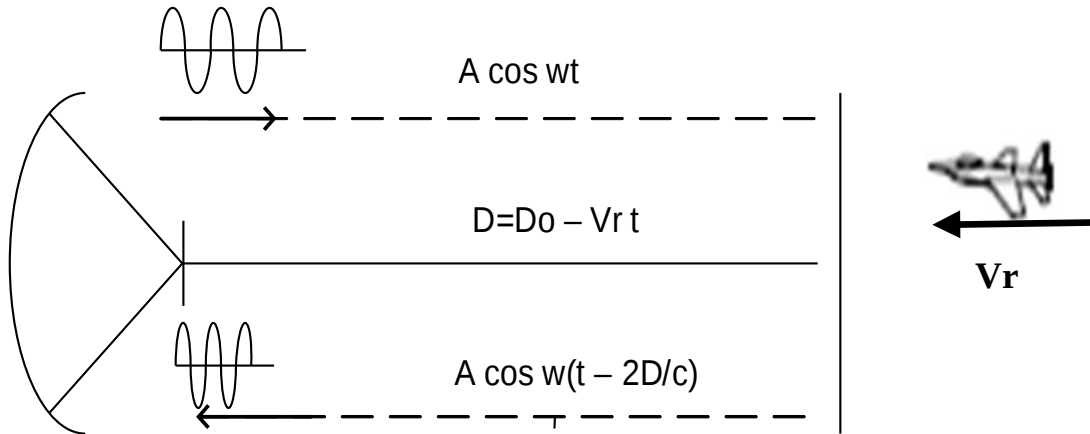


**Figure I-5 : paramètre de l'effet DOPPLER**

Si le signal émis est de la forme :

$$S_e = A \cos (2\pi f t)$$

Le signal reçu aura la forme suivantes :

$$S_r = A \cos \left[ 2\pi \left( f + \frac{2V_r}{c} \right) t + \phi \right]$$

La fréquence du signal reçu a augmenté donc de:

$$F_d = \frac{2V_r}{\frac{c}{f}} = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (I-2)$$

( $\frac{c}{f} = \lambda$  : longueur de l'onde émise,  $F_d$  : fréquence DOPPLER de la cible)

Dou

$$V_r = F_d \cdot \lambda / 2 \quad (I-3)$$

Cette translation de fréquence est en réalité due à une évolution de la durée du signal reçus. De tel manière que si  $T_e$  est la durée du signal émis,  $T_r$  la durée du signal reçus :

$$T_r = T_e (1 - 2V_r/c)$$

## I.6-CLASSIFICATION DES SYSTEME RADARS :

Les radars peuvent être classifiés dans de nombreuses catégories basées sur les caractéristiques spécifiques de radar, telles que la bande de fréquence, le type d'antenne, et les formes d'onde utilisées (radar à ondes continues CW et les radars à impulsions PR). On distingue aussi les radars de sol et les radars portés sur avion ou satellite.

### I.6.1- Classification des radars selon la forme de l’onde utilisée : [1], [6]

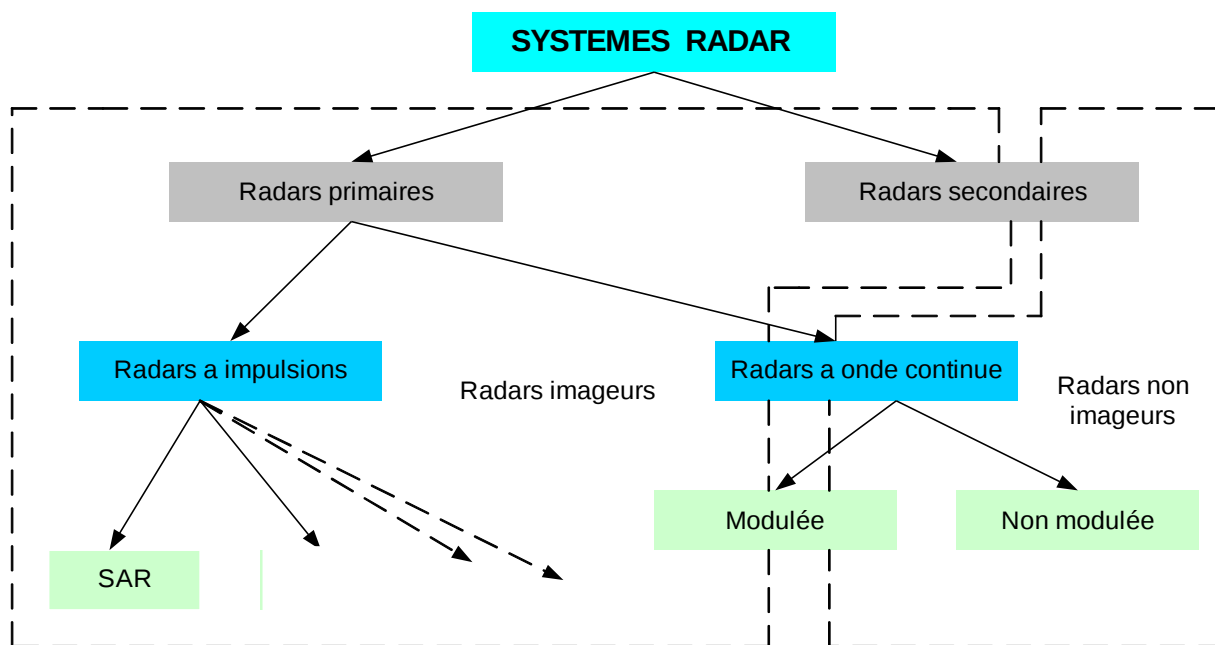


Figure I.6 : classification des systèmes radars

#### I.6.1.1-Radar secondaire :

Le radar secondaire fonctionne selon un principe différent : la cible qu'il éclaire génère (de façon active) les signaux de réponse. Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences (appelées **interrogations**). Celles-ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur qui les reçoit et les traite.

Ensuite, sur une fréquence différente, le transpondeur met en forme le signal et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par le radar secondaire.

### I.6.1.2-Radar primaire :

La figure-I-7- illustre le principe de fonctionnement du radar primaire :

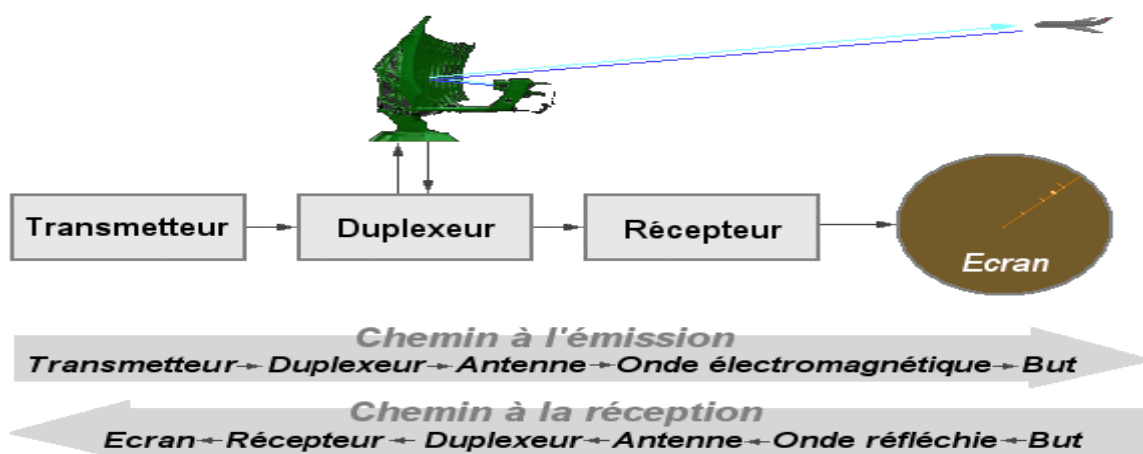


**Figure I-7 : schéma synoptique d'un radar primaire**

L'antenne du radar illumine la cible avec des signaux hyperfréquence, qui sont alors réfléchies par cette dernière puis reçues par le radar lui-même, donc l'écho de cette cible provient de l'impulsion émise par le radar.

Les échos détectés peuvent être visualisés sur l'écran traditionnel de type PPI (plan position indicator) ou sur tout autre système de visualisation plus élaboré. L'écran type PPI permet de visualiser un vecteur dont l'origine est la position actuelle du radar et la direction l'axe de l'antenne. Ce vecteur fait le tour de l'écran à la vitesse de rotation de l'antenne, et la position de l'axe de l'antenne au moment où un écho est détecté correspond donc à la direction dans laquelle se trouve cet écho.

### **I.6.1.2.1-Radar a onde continue :**

Les radars à ondes continues, Figure I-8, génèrent un signal hyperfréquence continu. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur.

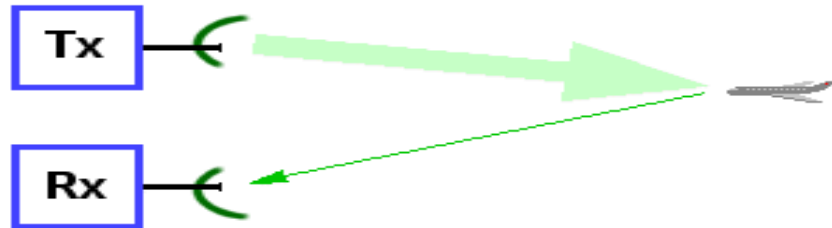


**Figure I-8 : Radar a onde continue**

#### **a-Radars à onde continue non modulée :**

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes.

#### **b- Radars à onde continue modulée :**

Le signal émis est constant en amplitude mais modulé en fréquence. Cette modulation rend à nouveau possible le principe de la mesure du temps de propagation.

### **I.6.1.2.2-Radar a impulsion :**

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance. Chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise.

Direction, distance et parfois, si cela est nécessaire, hauteur ou altitude de la cible, peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise.

### **Radars SAR (radar a ouverture synthétique) :**

Les radars a ouverture synthétique (RSO) (Figure I-9) , aéroportés ou a bord de satellite sont des radars imageurs capables de générer des images du sol de haute résolution, de jour comme de nuit et de façon pratiquement indépendante des conditions météorologiques. Ces application sont multiples aussi bien dans le domaine militaires: reconnaissance, que dans le domaine civile : cartographie, télédétection etc., ou le radar apporte des informations.

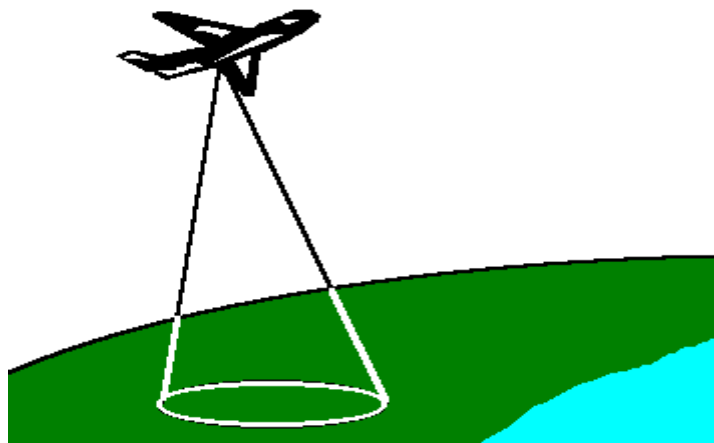


**Figure I-9 : Radar à Ouverture Synthétique (ROS)**

### **I.6.2-CLASSIFICATION DES RADAR SELON LE MODE D'EXPLOITATION DE L'ESPACE : [7 : E 6650]**

Les radars se différencient aussi entre eux par la manière dont ils exploitent l'espace à l'aide de leur antenne, nous allons définir quelques modes d'exploitation, selon que le radar soit au sol ou embarqué.

#### **I.6.2.1-RADAR DE SOL :**

##### **I.6.2.1.a-Radar panoramique :**

Le radar panoramique assure une exploration totale de l'espace par une rotation continue de son antenne autour d'un axe vertical.

L'exploitation de l'espace est effectuée de manière régulière ; les vitesses de rotation d'antenne sont de l'ordre de 6 tour/ min pour les radars à grande portée, 12 à 20 tour/ min pour des radars à moyenne portée, jusqu'à 60 tour/ min pour les radars à courte portée.

#### **I.6.2.1.b-Radar à exploration conique :**

Dans ce type de radar on cherche à déterminer simultanément les trois paramètres définissant la position de la cible, c'est-à-dire : sa distance, son site et son azimuth. Le pinceau radar sera alors d'ouverture en site et azimuth, l'antenne radar devenant circulaire. Pour chercher une cible dans un certain domaine, on peut avoir recouru à un balayage conique ainsi dénommé parce que la portion d'espace à explorer est un cône.

#### **I.6.2.1.c-Radar d'atterrissage :**

La plupart des aéronefs possèdent leurs moyens d'atterrissage sans visibilité utilisant le procédé ILS (Instrument Landing System). Cependant l'utilisation d'un radar sol spécialisé, appelé radar GAC (Ground Control Approach) permet de réaliser cette même fonction avec un avion doté seulement de la radio et guidé par un contrôleur au sol. Ce radar doit donc être capable de guider un aéronef sur un axe de descente il doit alors mesurer simultanément le site, l'azimuth et la distance de l'aéronef, par rapport à son point de posée.

#### **I.6.2.2-RADARS AEROPORTES :**

Les radars aéroportés se distinguent des radars de sol par le fait qu'ils constituent des observatoires élevés, propres à la détection à grande distance des cibles de surface ou évoluant à très basse altitude.

Leur situation particulière les amènera à être utilisés dans des fonctions particulières comme la navigation, la cartographie et la reconnaissance.

##### **I.6.2.2.a-Radars de veilles aéroportées :**

Les radars aéroportés sont spécialement utilisés pour la surveillance des aéronefs évoluant à basse altitude, mais aussi des véhicules terrestres et maritimes.

On peut les décomposer en trois catégories :

- **Les radars de surveillance aérienne :**

Destiner à détecter des avions évoluant à moyenne altitude à des distances supérieures à 400 Km. Capable d'une détection volumique, ils sont en mesure de créer des pistes 3D (position et altitude).

- **Les radars de surveillance maritime :**

Moins complexe que les précédents, ils sont destinés à la détection des navires de surface (cible de grande taille) ou des éléments émergés des sous-marins (cible de petite taille).

- **Les radars de surveillance terrestre :**

Destinés à détecter des véhicules au sol, ils utilisent l'effet DOPPLER pour les cibles en mouvement.

#### **I.6.2.2.b-Radar de conduite de tir :**

Appelés aussi radar d'interception, ils sont installés dans la pointe des avions de combat (intercepteurs) qui sont chargés de localiser les cibles désignées par les systèmes de surveillance, de les poursuivre et de délivrer au système d'alarme de l'avion toutes les informations nécessaires à la réalisation de l'interception.

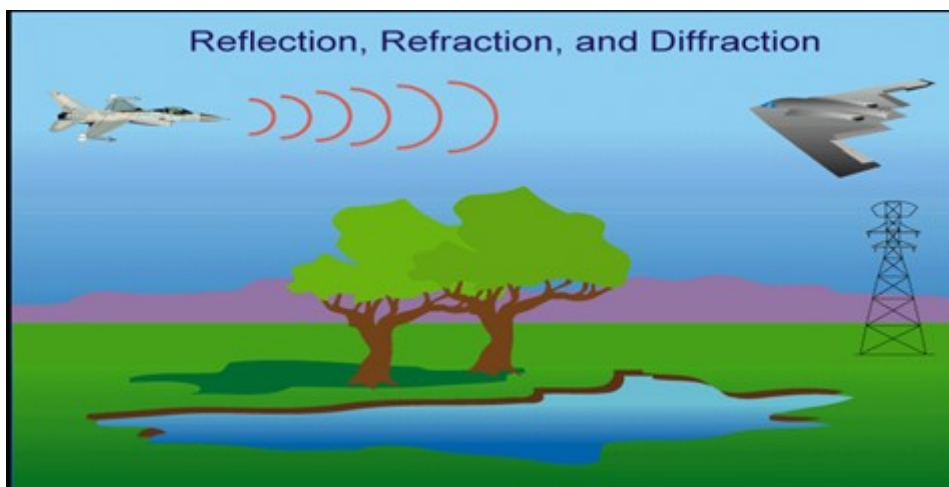


**Figure I-10 : Radar de conduite de tir**

#### **I.6.2.2.c-Radars de navigation :**

Ces radars sont destinés à apporter une aide complète à la navigation des aéronefs selon le type de mission envisager. Ils sont capables de tout ou partie des fonctions suivantes :

- Météorologique pour l'évitement des nuages dangereux.
- Détection et localisation des obstacles à développement verticales (câbles, lignes de tension,...) etc.

#### I.6.2.2.d-Radar de reconnaissance du sol :

Chargés d'effectuer une cartographie fine du sol avec une finesse d'image pouvant atteindre quelques mètres, ils utilisent la technique des antennes latérales ou synthétiques, ou SLAR (Side Looking Air borne Radar). De ce fait, leur faisceau d'antenne est dirigé perpendiculairement à la route de l'avion et couvre latéralement une portion de sol, la zone totale observée (ou fauchée) étant en outre définie par le chemin parcouru par l'avion, les images prises à distance de sécurité (50 à 100 Km) sont stockées à bord de l'avion, ou transmises par une liaison hertzienne à grand débit (environ 50 Mbit/s).

Le **SAR** qui fait l'objectif de notre travail appartient à la famille des radars de reconnaissance de sol.

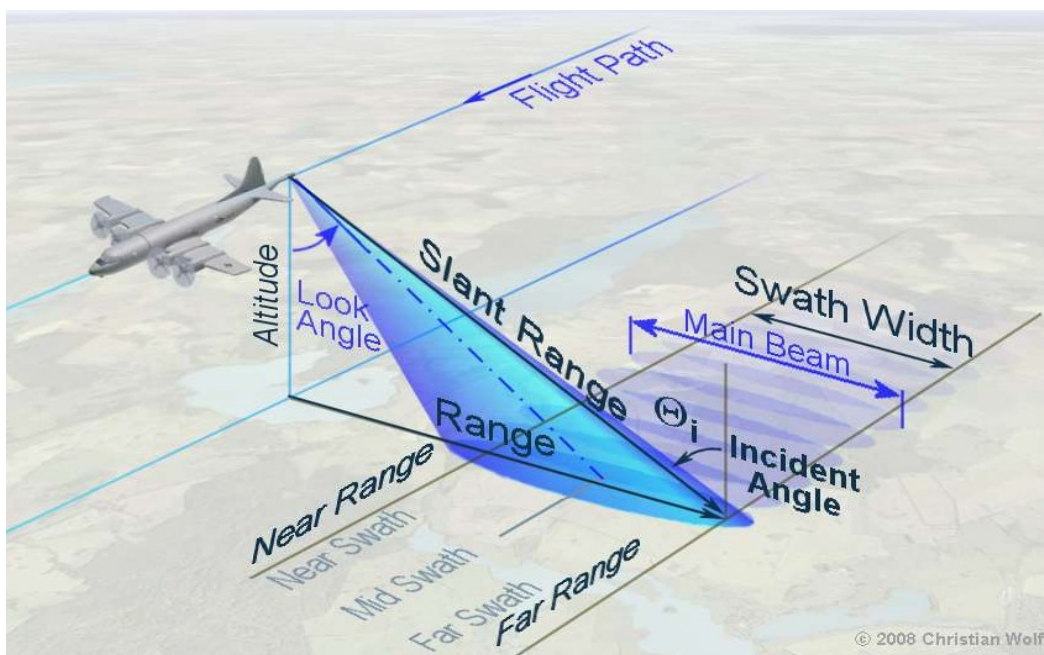


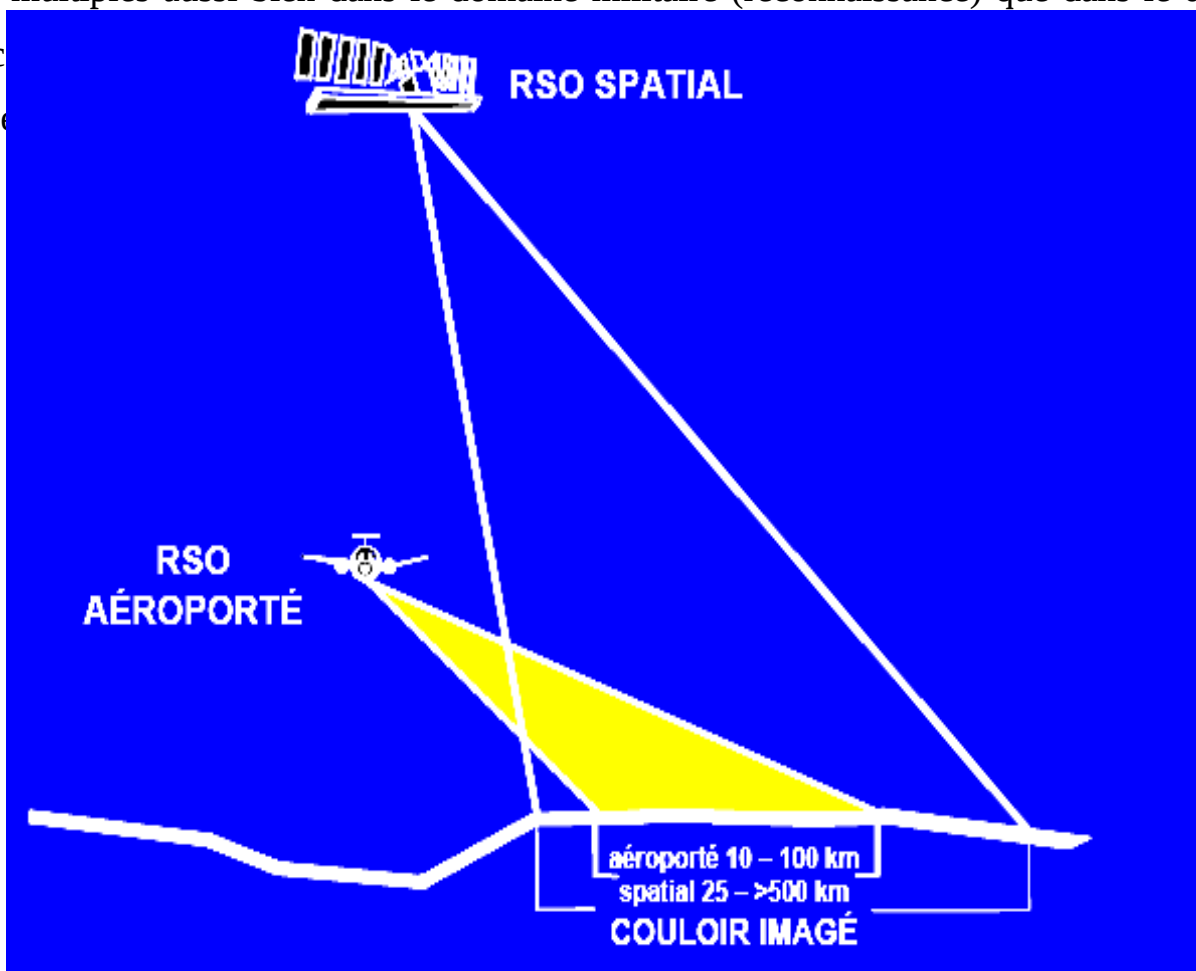
**Figure I-11 : Radar à Ouverture Synthétique (ROS)**

# CHAPITRE II

Principe et description du SAR

## II.1-INTRODUCTION :

Les radars à ouvertures synthétiques, aéroportés ou à bord de satellite, figure-II.1-, sont des dispositifs capables de fournir des images du sol de haute résolution, de jour comme de nuit et de façon pratiquement indépendantes des conditions météorologiques. Les applications en sont multiples aussi bien dans le domaine militaire (reconnaissance) que dans le domaine civil (cartographie, surveillance, etc.).



### **Figure II-1 : radar à ouverture synthétique**

Les premiers travaux sur les techniques d'antenne synthétique ont été menés au début des années 50 aux Etats-Unis. Le principe a été établi en juin 1951 par Carl Wiley.

Les premiers résultats expérimentaux obtenus avec une maquette aéroportée datent de juillet 1953. En 1958, le premier programme de radar haute résolution à antenne synthétique a été lancé pour des besoins militaires (surveillance de champs de bataille).

Le satellite américain SEASAT-A, lancé avec succès en 1978 et équipé d'un tel radar, a été développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL). La bonne qualité des images fournies a contribué à mieux faire connaître ce type de senseur et à ces immenses possibilités. De nombreux établissements ou laboratoires notamment aux Etats-Unis, au Canada, en Angleterre, en Allemagne et en France ont utilisé des données brutes du radar SEASAT pour se familiariser avec le traitement d'antenne synthétique. Dans ces pays, différents algorithmes ont été testés.

Un second radar, désigné par SIR-A, et toujours développé par le JPL, a été expérimenté avec succès au cours du deuxième vol de la navette spatiale Columbia en novembre 1981. Aujourd'hui, parmi les SAR en activité il y'a : ERS-1, ERS-2, JERS-1, etc.

## **II.2- LE DOMAINE DU SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE DU SAR :**

[11]

### **II.2.1- Choix de la longueur d'onde :**

Les longueurs d'onde utilisées en imagerie radar sont rappelées dans le tableau -II.1- La portion du spectre électromagnétique utilisée en imagerie radar couvre une longueur d'onde d'une étendue variant du mètre au centimètre. Ces longueurs d'onde sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges, ce qui explique leur choix en télédétection : elles sont quasiment insensibles aux différentes couches de l'atmosphère.

| Bande          | Fréquence (GHz) | Longueur d'onde (cm) |
|----------------|-----------------|----------------------|
| P              | 0.225-0.39      | 133-76.9             |
| L              | 0.39-1.55       | 76.9-19.3            |
| S              | 1.55-4.20       | 19.3-7.1             |
| C              | 4.20-5.75       | 7.1-5.2              |
| X              | 5.75-10.9       | 5.2-2.7              |
| K <sub>u</sub> | 10.9-22         | 2.7-1.36             |
| K <sub>a</sub> | 22-36           | 1.36-0.83            |

**Tableau II-1**

Parmi le spectre des hyperfréquences, le choix de la longueur d'onde est guidé par deux critères importants :

**a. La sensibilité à la traversée de l'atmosphère :**

Les longueurs d'onde insensibles à l'atmosphère sont généralement préférées. Pour résumer, les bandes hautes hyperfréquences  $K_u$  et  $K_a$  subissent des atténuations dans les couches basses de l'atmosphère alors que les bandes basses hyperfréquences subissent de fortes dispersions à la traversée de l'ionosphère. C'est pourquoi les bandes L, S, C et X sont les plus utilisées dans un contexte spatial (observation, télécommunications, navigation, etc.).

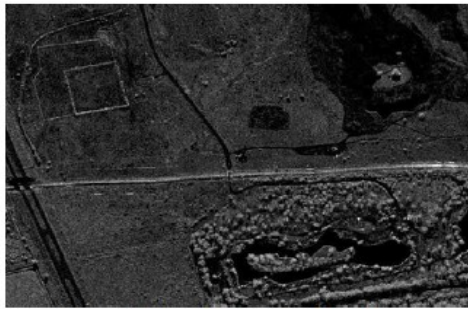
**b. La sensibilité à la matière :**

Les propriétés d'interaction onde-matière ne sont pas les mêmes pour les différentes bandes. Suivant l'application visée par la mission (étude du couvert végétal, étude des sous sols...), le choix de la longueur d'onde est ainsi fortement guidé par ce que nous voulons étudier.

Les grandes longueurs d'onde traversent facilement la canopée et pénètrent certains types de sol. Ainsi les bandes L et P sont utilisées pour des applications géophysiques (cartographie des «sous-sol» naturels, étude de la biomasse, classification des agricultures etc).

Les longueurs d'onde plus petites sont plus sensibles à la rugosité. Ainsi la bande X est caractérisée par une diffusion de surface. Elle est ainsi préférée pour les applications militaires et l'étude du milieu urbain (cartographie, reconnaissance de structure, haute résolution spatiale). Les futures missions spatiales haute résolution (Cosmo-Skymed, SAR-Lupe, etc.) privilégient cette bande de fréquence.

En bande  $K_u$  et  $K_a$ , caractérisées par de petites longueurs d'onde, de nombreuses surfaces sont rugueuses comme le montre les images de la figure -II.2-. En bande  $K_u$ , les ombres se distinguent facilement radiométriquement des autres surfaces de la scène, pour la grande majorité rugueuses par rapport à la longueur d'onde du signal incident (exemple de l'ombre du monument central de l'image -II.2- (c)).



(a) Isleta Lake, Isleta Pueblo, Nouveau Mexique, Etats Unis



(b) Albuquerque, Nouveau Mexique, Etats Unis

Images radar en amplitude en bande X



(c) Washington Monument, Washington DC, Etats Unis



(d) The Jefferson Memorial, Washington DC, Etats Unis

Images radar en amplitude en bande Ku

## Figure II-2 : Images radar en bande X et Ku

Les bandes C et S constituent généralement un compromis acceptable entre toutes les applications et les propriétés atmosphériques requises ; c'est pourquoi elles sont exploitées par les missions satellitales en cours (ERS 1&2, Radarsat 1&2, etc).

### II.3-L'EQUATION DU RADAR (SAR) : [3], [4],

L'équation radar est un bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise par un radar. Cette équation dépend des composants du radar, (antenne, circuits électroniques, guide d'onde, pertes du signal...), des caractéristiques et propriétés du milieu, les premières sont des constantes alors que celle des cibles et milieu de propagation peuvent varier dans le temps et dans l'espace.

L'équation du radar donne la puissance moyenne rétrodiffusée en tout point de l'image. Elle est donnée par :

$$< \mathbf{P}_r > = \mathbf{P}_t \frac{G^2 \lambda^2 q}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_o \quad (\text{II-1})$$

$< \mathbf{P}_r >$ : Puissance moyenne reçue.

$\mathbf{P}_t$  : puissance transmise.

$G$ : gain de l'antenne.

$\lambda$  : longueur d'onde émise.

$\sigma_o$  : Coefficient de réflexion de la cible.



**R**: distance cible-radar oblique.

**q** : constante tenant compte des pertes divers.

## II.4-LES FACTEURS INFLUENTS SUR L'INFORMATION : [11],[16]

Le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_0$ , donne des informations sur la scène imagée. Il est fonction de l'onde émise d'une part, et des propriétés géométrique et diélectrique de la scène d'autre part. Parmi les facteurs influençant sur  $\sigma_0$ , on citera : la fréquence, la polarisation d'une onde, l'angle d'incidence, propriétés géométriques de la surface observée, humidité.

a. **La fréquence** : plus la fréquence diminue, plus la profondeur de pénétration est importante dans le milieu observé.

### b. La polarisation d'une onde :

Une notion importante en imagerie radar est la notion de polarisation. Son choix influence beaucoup sur la nature de l'information de l'image SAR. Elle peut nous renseigner sur la forme et l'orientation des petits éléments diffuseurs.

La polarisation d'une onde représente l'orientation de son champ électromagnétique. Plus précisément, elle décrit le lieu de l'extrémité de son champ électrique  $\vec{E}$  (voir figure -II.3-).

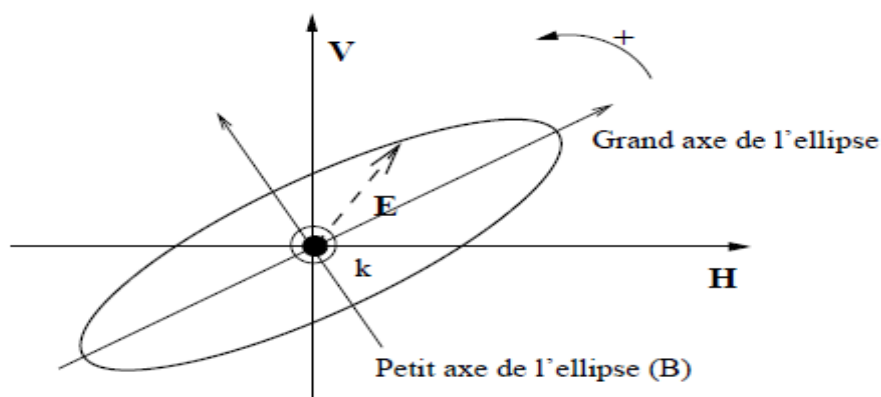


Figure II-3 : Définition de la polarisation d'une onde

Généralement ce lieu de point est une ellipse mais peut dans certains cas particuliers dégénérer en un segment linéaire (on parle de polarisation linéaire) ou un cercle (on parle de polarisation circulaire). Dans le domaine de l'observation radar, on utilise des polarisations linéaires. Parmi celles-ci, deux cas particuliers sont à distinguer :

- la polarisation H, pour laquelle le champ  $\vec{E}$  est parallèle à la surface éclairée.
- la polarisation V, pour laquelle le champ  $\vec{E}$  est dans un plan orthogonal à la surface éclairée.

Un système radar est généralement conçu pour émettre et recevoir une polarisation donnée, mais certains nouveaux systèmes peuvent émettre et recevoir au choix dans les deux polarisations. On distingue quatre combinaisons de polarisations de transmission et de réception :

- HH : émission et réception en polarisation horizontale.
- VV : émission et réception en polarisation verticale.
- HV : émission en polarisation horizontale et réception en polarisation verticale.
- VH : émission en polarisation verticale et réception en polarisation horizontale.

**c. L'angle d'incidence :** pour les cibles naturelles, plus l'angle d'incidence est grand, plus la surface imagée est importante.

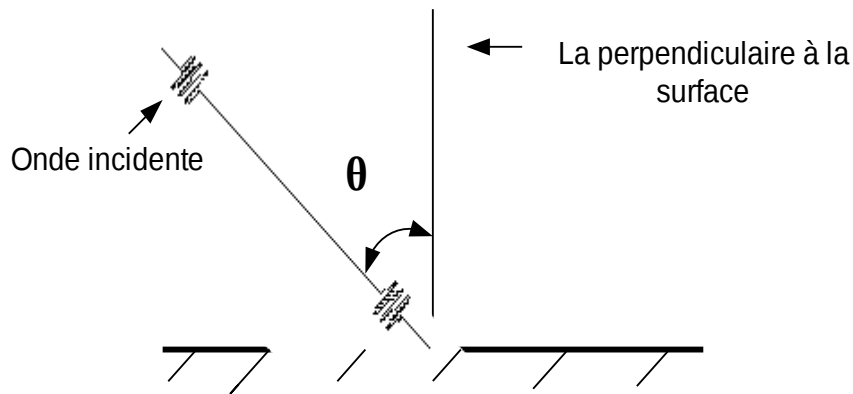


**Figure II-4 : Angle d'incidence**

#### **d. Propriétés géométriques de la surface observée :**

*La notion de rugosité* d'une surface est étroitement liée à la notion de coefficient de rétrodiffusion. Elle traduit la capacité d'une surface à renvoyer plus ou moins d'énergie vers le capteur. Le degré de rugosité d'une surface est fonction de la longueur d'onde. Le critère de Rayleigh dit qu'une surface est lisse par rapport à une longueur d'onde, sous une incidence  $\theta$  si l'écart type des hauteurs de la surface  $\Delta h$  vérifie la contrainte suivante :

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

Ainsi une surface peut être lisse par rapport aux grandes longueurs d'onde et être rugueuse par rapport aux longueurs d'onde plus petites.

#### **e. Humidité (propriétés diélectriques) :**

Le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_0$ , augmente avec la constante diélectrique du milieu, et donc avec l'humidité. Une surface humide fournira un écho plus fort qu'une surface plus sèche de même géométrie.

## **II.5-PRINCIPE DES RADARS IMAGEURS :**

### II.5.1-Radar imageur a antenne réelle : [11]

Le radar à visée latérale et à antenne réelle a été le premier radar imageur utilisé. Son fonctionnement est simple et illustré sur la figure -II.5-. Il émet des trains d'impulsions d'ondes hyperfréquences dans une polarisation donnée et dans une direction oblique à la scène. Il est généralement monté sur une plateforme aéroportée ou embarqué sur un satellite qui suit une trajectoire rectiligne. Ces ondes sont réfléchies ensuite par la surface de la terre ; ce sont les échos retournés qui permettent la formation de l'image.

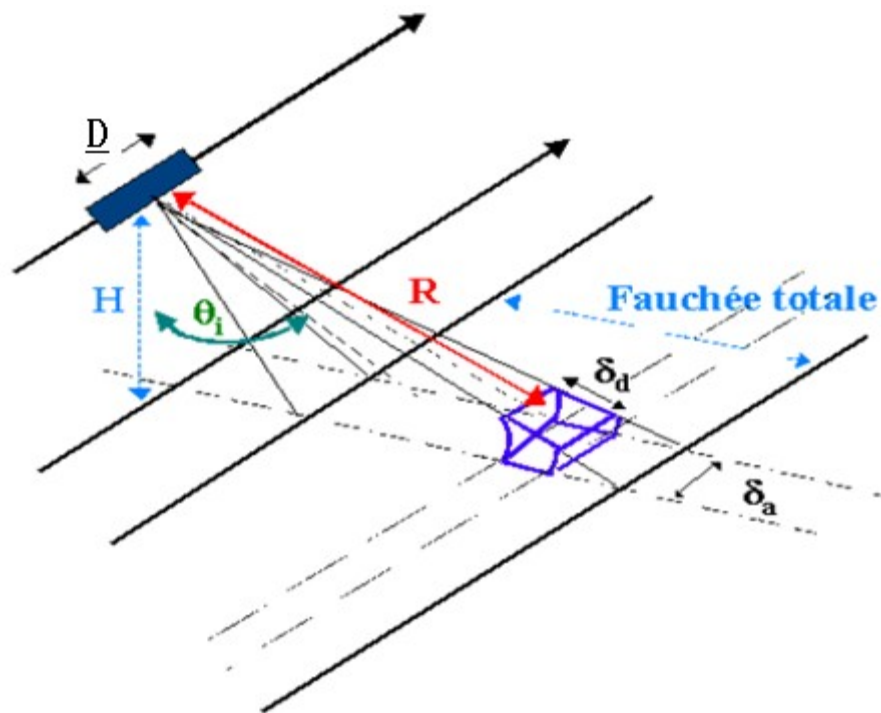


Figure II-5 : Principe du radar à antenne réelle

Pour réaliser une image, le radar fonctionne successivement en mode émission puis réception figure -II.6-. A un instant  $t$  donné, une impulsion d'une certaine durée  $\tau$  est émise. Le capteur bascule ensuite en mode réception et enregistre pendant une certaine durée  $\Delta t$ , les échos renvoyés par la scène observée. Cet enregistrement permet la formation d'une ligne de l'image. Après une durée égale à 1  $PRF$ , la  $PRF$  désignant la fréquence de répétition des

impulsions, le capteur bascule à nouveau en mode émission et une nouvelle impulsion est émise.

Entre l'instant  $t$  et  $(t + 1PRF)$ , le porteur, de vitesse  $v$ , s'est déplacé d'une distance  $\frac{v}{PRF}$ , ce qui permet l'acquisition de la ligne suivante et donc le balayage des colonnes de l'image.

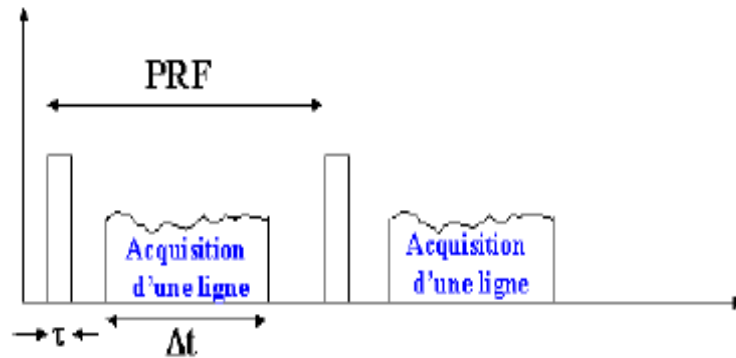


**Figure II-6 : Principe de formation des images**

La première grandeur qui caractérise le radar imageur, est la résolution, elle représente la plus petite distance qui doit séparer deux cibles. Cette résolution correspond à la dimension d'un objet (ou écho) ponctuel vu par le radar. Elle se décompose de la façon suivante :

- Résolution en distance, c.-à-d. dimension de l'écho suivant la direction de visée
- Résolution en azimuth, c.-à-d. dimension de l'écho dans une direction orthogonale à la précédente.

La résolution azimutale est proportionnelle à la longueur d'onde  $\lambda$  utilisée et inversement proportionnelle à la longueur  $\mathbf{D}$  de l'antenne. La résolution en azimut, pour un point situé à une distance  $\mathbf{R}_0$  vaut :

$$\delta_a = R_0 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{II.2})$$

La résolution en distance  $\delta_d$  est directement liée à la durée d'impulsion  $\tau$  utilisée par le radar.

Si l'angle d'observation d'une zone de sol, par rapport la verticale vaut  $\theta_i$  alors :

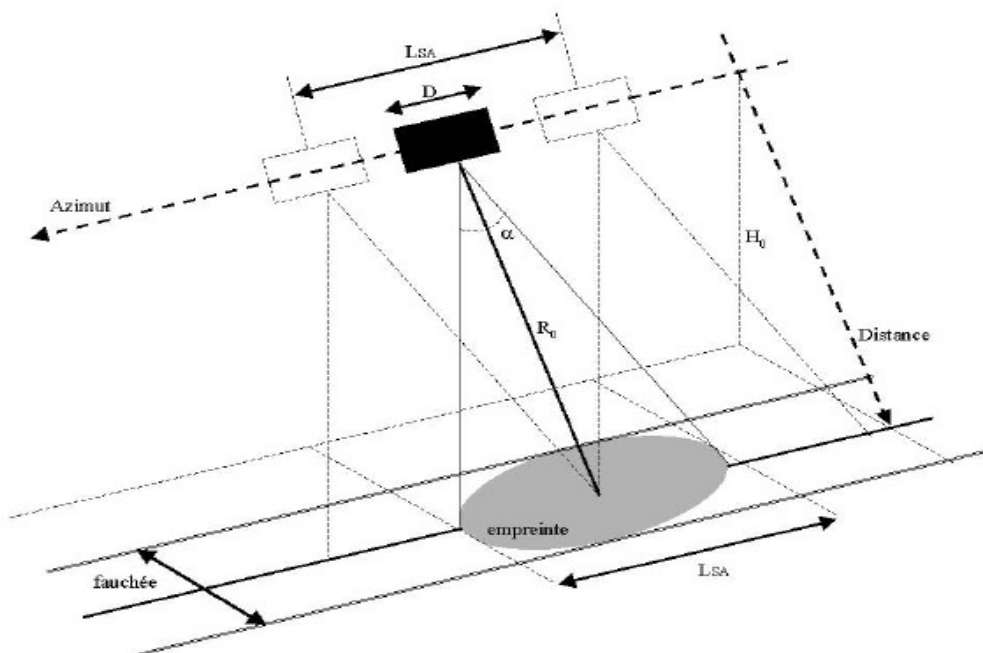
$$\delta_d = c \frac{\tau}{2 \sin \theta i} \quad (\text{II.3})$$

Où  $c$  est la vitesse de la lumière.

### II.5.2-Radar imageur a antenne synthétique (SAR) :

### II.5.2.1-Principe du radar a antenne synthétique : [8], [9]

Le **SAR** est un radar imageur qui effectue un traitement des données reçues afin d'améliorer la résolution azimutale. Le traitement effectué permet d'affiner l'ouverture de l'antenne. On parle de synthèse d'ouverture, d'où le nom de ce type de système.



## Figure II-6 : Principe du radar à antenne synthétique

D'après l'équation (II.3) il est relativement facile d'obtenir une bonne résolution en distance radar, il suffit de réduire la durée d'impulsion  $\tau$  en utilisant la technique de compression d'impulsion. Par contre la relation (II.2) montre que l'obtention d'une bonne résolution en azimut, à grande distance, suppose avec un radar à antenne réelle:

- De monter en fréquence (diminution de  $\lambda$ ) ; mais les phénomènes de propagation interdisent de grandes portées et les difficultés de réalisation technologique croissent.
- D'utiliser une antenne de grande dimension (plusieurs mètres, voir plusieurs dizaines de mètres), ce qui conduit à une chose irréalisable pour un matériel embarqué.

L'amélioration de la résolution en azimut (nécessaire pour avoir une image radar de qualité) est obtenue par la mise en œuvre de techniques d'antenne synthétique. L'appellation **antennes synthétique** signifie que le déplacement du radar et le traitement des signaux reçus pendant ce déplacement sont équivalant à une antenne **fictive** de très grande dimension (plusieurs centaines de mètres).

A mesure que la plate-forme avance avec une vitesse constante  $v_p$ , des signaux sont émis et leur échos sont reçus sans que la position de celle-ci n'ait changé de manière significative, du fait que la célérité de la lumière est largement supérieure à la vitesse de la plate-forme ( $c \gg v_p$ ). Comme le montre la figure -II.6-, à chaque position de la plate-forme en azimut, la surface est illuminée sur un intervalle en distance appelé la **fauchée**.

Le principe du radar à synthèse d'ouverture est de simuler par des techniques de traitement du signal adéquates en exploitant l'effet Doppler, les conditions nécessaires à l'amélioration de la résolution.

Ainsi le principe dit de compression d'impulsion permet de simuler l'émission d'une onde de durée très courte, autorisant de grandes résolutions en distance et de puissance compatible avec la technologie embarquée actuelle.

### II.5.2.1.a- La compression d'impulsion : [11], [12]

Pour améliorer la résolution en distance, on émet des signaux linéairement modulés en fréquence autour d'une fréquence centrale  $f_c$ . Ces signaux sont communément appelés **chirp** et sont définis pour un signal de durée  $\tau$  par l'équation :

$$S(t) = a(t) e^{2\pi j (2 (f_c t + \frac{1}{2} \alpha t^2))} \quad \forall t \in [\tau/2, \tau/2] \quad (II.4)$$

$\alpha$  désigne le taux de modulation, il est défini par  $\alpha = \frac{B_c}{\tau}$  avec  $B_c$  la largeur de bande passante du signal.

Ces signaux ont la particularité de posséder une grande bande passante. Le principe de la compression d'impulsion exploite cette propriété très intéressante des chirps. A la réception des échos réfléchis par la surface irradiée par un chirp, un filtrage adapté de ces signaux avec le signal émis par l'antenne est effectué. La réponse impulsionnelle du système est ainsi un sinus cardinal dont la largeur à -3dB (durée de l'impulsion à -3dB) est égale à  $\tau = 1/B_c$ . La résolution radiale en distance du système devient finalement :

$$\delta_d = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B_c} \quad (II.5)$$

La résolution dépend maintenant uniquement de la bande passante du chirp. Plus celle-ci sera grande, meilleure sera la résolution en distance. Par exemple, une résolution de 1mètre est facilement accessible via une bande de fréquence de 150MHz de large. Le radar haute résolution aéroporté RAMSES de l'ONERA utilise des largeurs de bande jusqu'à 1200MHz pour atteindre des résolutions de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Enfin pour respecter le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage en distance doit vérifier la contrainte suivante  $F_e \geq B_c$ .

Le principe général de la compression des impulsions peut être exprimé à partir du raisonnement suivant :

Le système radar comprend : un oscillateur local découpé pour former un train d'impulsions, les circuits d'émission-réception, un filtre adapté et un détecteur, figure-II.7-.

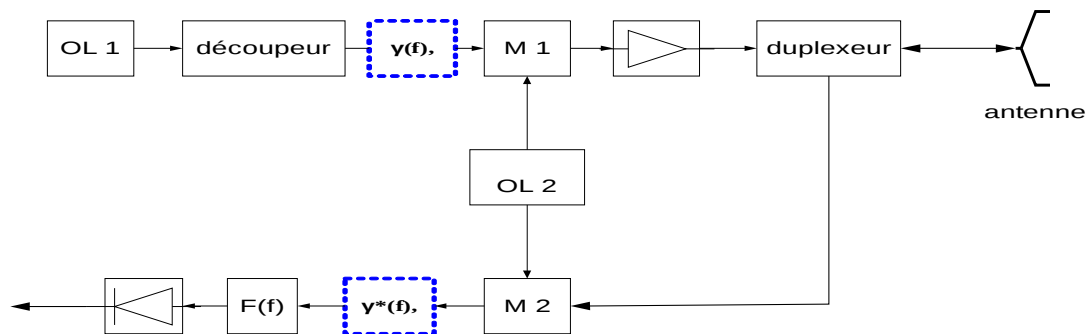


**Figure II-7 : Le système radar**

Plaçant après le découpeur du signal d'émission un filtre  $\gamma(f)$  qui n'apporte pas de modification aux amplitudes de signal mais a comme caractéristique de déphaser différemment les diverses fréquences du spectre du signal émis, ces déphasages déforment le signal émis dans le sens d'allonger le spectre du signal. On aboutit à un signal comprimé de durée  $\tau$  qu'on peut choisir.

### Concept De base :

Après la modulation linéaire de fréquence le signal, naturellement, a la même augmentation linéaire de la fréquence. figure-II.8-.

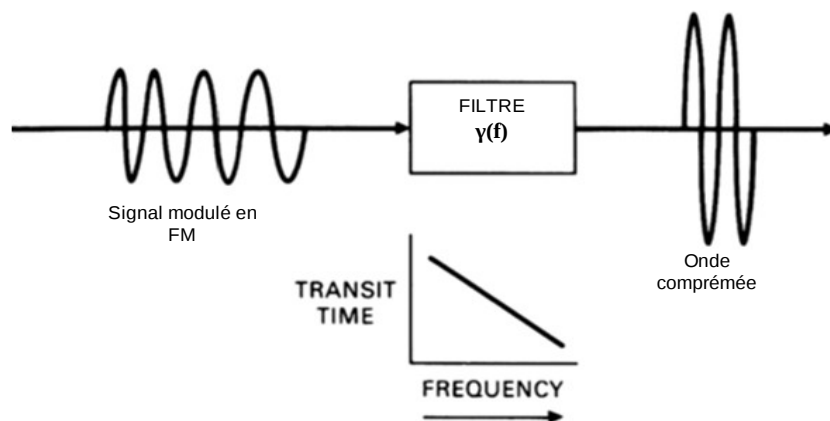


**Figure II-8 : Principe de compression**

Les signaux passent par un filtre qui présente un temps de transition qui diminue linéairement avec la fréquence, exactement au même taux que l'augmentation de fréquence des signaux.

Quand l'impulsion sort du filtre son amplitude est beaucoup plus grande et sa largeur beaucoup moins que celle d'entrée, figure-II.8-. L'impulsion a été comprimée.

### Explication d'augmentation de fréquence :

Ce qui se produit réellement, quand un signal traverse le filtre de compression peut être visualisé le plus facilement si nous supposons que le signal se compose d'un certain nombre de segments de longueur égale et de la fréquence progressivement plus élevée. figure-II.9-.

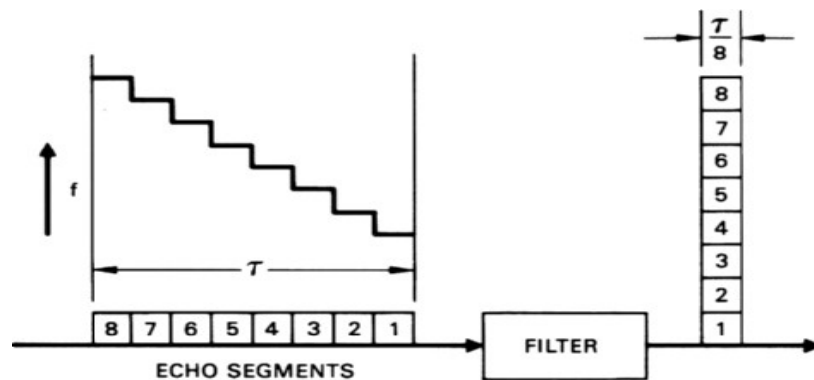


**Figure II-9 : augmentation de fréquence**

En fait, Le premier segment, ayant la plus basse fréquence, prend le plus long temps pour traverser le filtre. Le deuxième segment prend moins de temps que le premier; le troisième moins de temps que le second, etc...

En conséquence, à la sortie de filtre, le deuxième segment se rattrape par rapport au premier; le troisième segment se rattrape par rapport au second, et ainsi de suite. Tous les segments combinent et sortent ainsi du filtre en même temps.

A la réception, après changement de fréquence nous placerons un filtre  $\gamma^*(f)$ , dans le but de compenser les déphasages apportés par le filtre  $\gamma(f)$ . À la sortie de  $\gamma^*(f)$ , on retrouve donc le signal court du radar, identique au signal reçu en absence de ces filtres, qui sera traité par le filtre adapté  $F(f)$ .

L'introduction de ces filtres n'a donc rien modifié aux caractéristiques du signal reçu, seul le signal émis a été allongé par  $\gamma(f)$  puis comprimé par  $\gamma^*(f)$ , d'où le nom de **compression des impulsions** donné au procédé.

#### II.5.2.1.b-La synthèse d'ouverture : [11]

Pour augmenter la résolution en azimuth, un procédé similaire est employé. Il s'agit d'exploiter la modulation linéaire de fréquence induite naturellement par l'effet Doppler découlant du mouvement relatif du porteur par rapport à la scène fixe.

Pendant le temps où la trace du faisceau de l'antenne se déplace au sol, elle illumine plusieurs fois les différents éléments de la zone imagée (on parle de temps d'illumination). A chaque enregistrement d'un écho, le porteur s'est déplacé par rapport à la scène. La distance relative scène-capteur, ainsi que l'angle d'incidence local, varient donc localement entre deux réceptions.

La synthèse d'ouverture (SO) consiste à combiner de façon intelligente ces différentes réponses d'une même cible vue sous des angles différents dans la direction de déplacement du porteur. La figure -II.10- présente le principe de la synthèse d'ouverture.

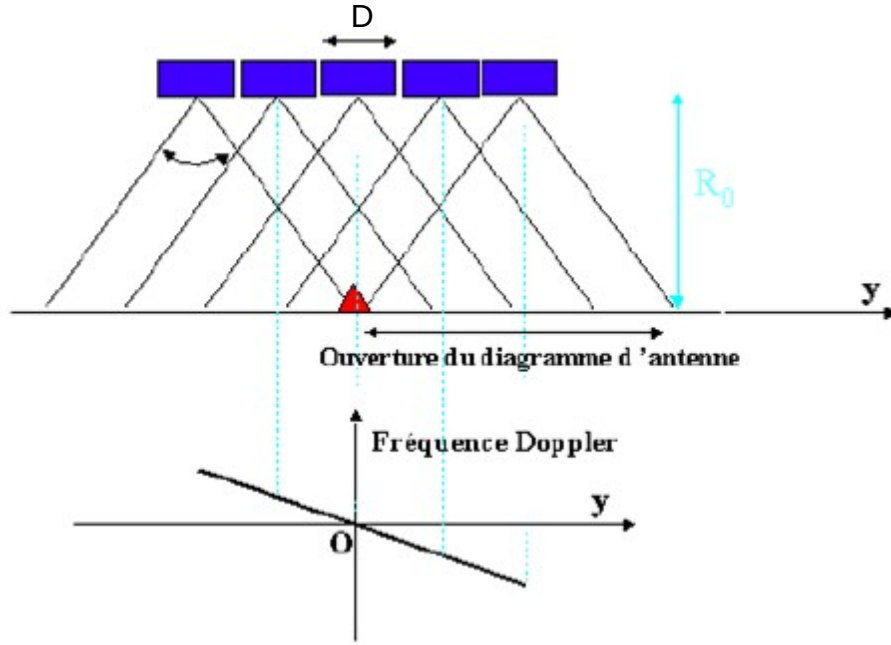


**Figure II-10 : Principe de la synthèse d'ouverture**

Considérons une cible fixe au sol et notons  $R_0$  la distance minimale (à Doppler zéro) entre la cible et l'antenne. Considérons un repère (Oxy) tel que le centre O soit positionné sur la cible fixe, et l'axe (Oy) soit orienté dans le sens de déplacement du porteur. L'origine des temps est placée au moment où le satellite est à une distance  $R_0$  de la cible. Enfin le porteur a une vitesse constante notée  $v$ . Dans la suite,  $f_c$  désigne la fréquence centrale de l'onde émise. La cible est illuminée plusieurs fois par l'antenne. A un instant donné  $t$ , la vitesse du porteur étant supposée constante, la position  $y$  de ce dernier dans le repère (Oxy) lié à la cible est donnée par  $y = vt$ . En supposant  $R_0$  très grand devant  $y$ , on en déduit la distance relative  $R(t)$  du porteur et de la cible.

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + y^2} = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2} \simeq R_0 + \frac{(vt)^2}{2R_0} \quad (\text{II.6})$$

La phase instantanée  $\Phi(t)$  de l'onde réfléchiée par la cible, après le parcours aller-retour entre le capteur et la cible, est alors la suivante :

$$\phi(t) = 2\pi f_c \left( t - \frac{2R(t)}{c} \right) \quad (\text{II.7})$$

Ce qui correspond à une fréquence instantanée :  $d\phi/dt$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = f_c - \frac{2f_c v^2 t}{c R_0} = f_c - \frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{II.8})$$

La variation de la distance relative cible-porteur entraine ainsi une variation de la vitesse relative du porteur par rapport à la cible et donc un effet Doppler. La fréquence Doppler résultante à un instant  $t$  vaut :

$$f_D = f(t) - f_c = -\frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (\text{II.9})$$

L'onde reçue par la cible pendant l'intervalle de temps, a ainsi une fréquence linéairement variable en fonction du temps et de la vitesse du porteur.

Il peut être vu comme un chirp dont la bande passante  $B_D$  est fonction de la durée d'illumination de la cible par l'antenne. Le choix d'une résolution à -3dB du lobe d'antenne,

nous donne la valeur de cette période  $T$  d'illumination  $T = \frac{R_0 \lambda}{Dv}$ , On en déduit

$$: B_D = \frac{2v^2 T}{\lambda R_0} = \frac{2v^2 \lambda R_0}{\lambda R_0 Dv} = \frac{2v}{D}$$

Soit une durée d'impulsion :

$$\tau' = \frac{1}{B_D} = \frac{D}{2v}$$

La résolution en azimuth d'un système radar RSO correspond alors à la distance parcourue pendant cet intervalle  $\tau'$ , à savoir :

$$\delta_a = v \tau' = \frac{D}{2} \quad (\text{II.10})$$

La résolution en azimuth dépend uniquement de la taille de l'antenne réelle embarquée à

bord du porteur. Contrairement aux cas des radars à antennes réelles, plus l'antenne est petite, meilleure est la résolution.

Prenant l'exemple d'ERS avec son antenne de 10 mètres, le processus de synthèse d'ouverture permet d'atteindre une résolution de 5 mètres contre 4.5 km sans synthèse d'ouverture.

Finalement rappelons que l'échantillonnage en azimuth est naturellement effectué par la fréquence de répétition des impulsions (PRF). L'étendue spectrale en azimuth étant égale à  $B_D$ , le théorème de Shannon implique la contrainte suivante sur la  $PRF$  :

$$PRF \geq B_D \text{ C'est-à-dire } PRF \geq \frac{2v}{L}$$

## II.6- COMPARTIMENTS DU SAR :[1],[17]

### Principe de l'émission-réception :

**L'émetteur SAR** émet des ondes électromagnétiques sous forme d'impulsions.

Pour obtenir une bonne résolution la durée d'une impulsion  $\tau_p$  doit alors être aussi faible que possible. Or, cette impulsion doit pouvoir être générée avec une énergie suffisamment forte, afin de capter un signal rétrodiffusé suffisamment important vis-à-vis du bruit. Pour avoir toutes ces conditions, la technique de compression d'impulsion fondée sur l'émission d'un « chirp » (signal dans la fréquence centrale varie linéairement avec le temps), est couramment employée.

En réception, l'impulsion est compressée au moyen d'un traitement adapté au type de modulation émise.

La modulation la plus couramment utilisée est la modulation linéaire de fréquence à cause de sa faible sensibilité au décalage DÖPPLER et grâce aux taux de compression qu'elle autorise

La figure -II.11- représente le schéma synoptique d'une chaîne d'émission-réception.

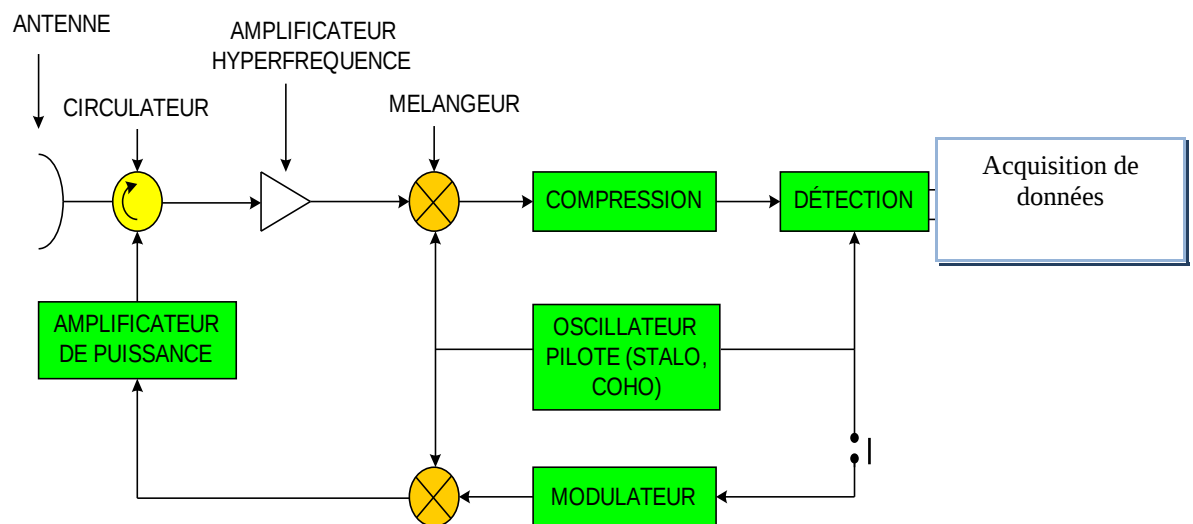


**Figure II-11 : chaîne d'émission réception**

### II.6.1- EMETTEUR :

L'émetteur RADAR génère un signal RF (radio fréquence) avec quoi on illumine les cibles. Il existe deux types d'émetteurs radar : les radars à émetteur cohérent et non cohérent.

Le **SAR** a un émetteur cohérent qui génère un signal (impulsion) de phase constante et prédictible qui dérive des sources stable interne. En comparant la phase de signal émis et celle de l'écho, on peut mettre en évidence l'effet Döppler à travers la différence de fréquences de ces signaux.

Ce type d'émetteur est appelé **MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)** car les paramètres du signal (phase, fréquence) sont obtenues grâce à l'oscillateur commandé. L'émetteur dispose d'un **amplificateur de puissance**, figure -II.12-, qui est caractérisé par sa puissance crête (quelques kW) et sa puissance moyenne (de quelques dizaines à quelque centaines de Watts suivant l'application).

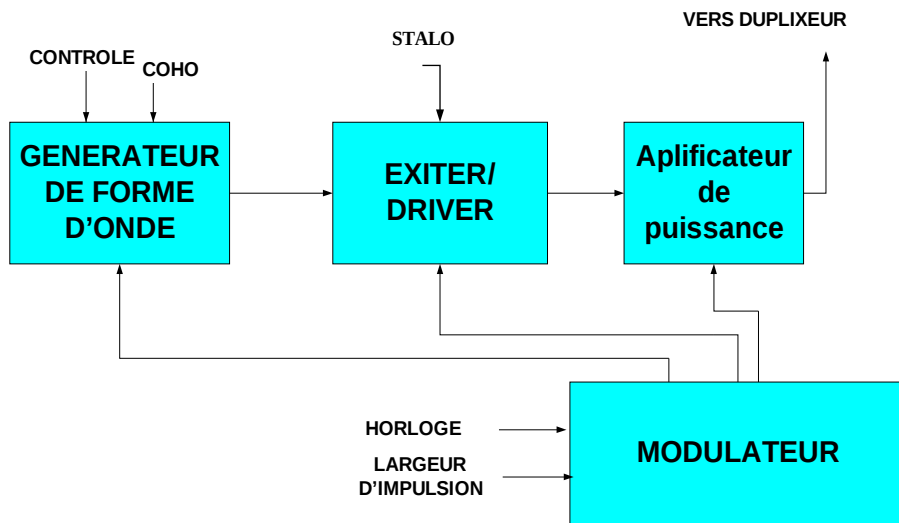


**Figure II-12: Principe de l'émission**

#### **II.6.1.1- Amplificateur de puissance :**

Les amplificateurs radars sont réalisés à l'aide de klystrons ou de tubes à ondes progressives (TOP) pour des fréquences élevées (bande C et bande X dans le cas du SEASAT).

Par ailleurs, ils sont réalisés, pour la bande L et pour des puissances moyennes inférieures à 100 W, à l'aide d'amplificateurs à état solide (transistors, diodes).

##### **a)-Klystron : [10], [7 : E 6650]**

Le Klystron, figure-II.13-, est un tube à vide qui permet de réaliser des amplifications de moyenne et forte puissance à bande étroite en hyperfréquence.



**Figure II-13 : klystron pour communication spacial**

**b)-Tube à ondes progressives (TOP) :**

Le tube à ondes progressives (traveling-wave tube) est utilisé en hyperfréquence pour réaliser des amplificateurs de faible, moyenne ou forte puissance. Il permet de réaliser des amplificateurs à bande large et à très faible bruit de fond.

**Principe de fonctionnement :**

Dans les TOP, figure-II.14-, l'interaction entre le signal hyperfréquence et le faisceau d'électrons est continue tout au long de la structure hyperfréquence qui doit pour ce faire, posséder deux propriétés principales :

- crée un champ électrique axial pour agir sur le faisceau, par modulation de vitesse des électrons.
- Obtenir une vitesse de propagation de l'onde voisine de celle des électrons dans un faisceau, soit deux à trois fois inférieur à la vitesse de l'onde dans l'espace.

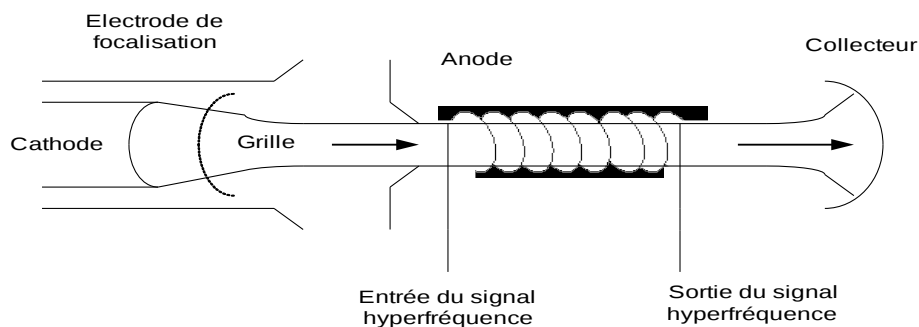


**Figure II-14 : Principe de fonctionnement d'un TOP**

**Exemple :**

Le radar RAMSES, qui est un radar imageur de type SAR, peut atteindre des résolutions spatiales de l'ordre du décimètre. La technologie utilisée pour assurer l'amplification des signaux à l'émission diffère selon la bande de travail.

A titre d'exemple, on peut trouver :

- des amplificateurs à état solide pour les bandes basses (P, L, S).
- des amplificateurs à ondes progressives (TOP) pour les bandes (X, Ku, Ka).
- et des klystrons pour la bande W.

**II.6.1.2- Modulateur :**

Les modulateurs sont des dispositifs grâce auxquels les tubes d'émission radar peuvent fonctionner en impulsion. Ces dispositifs doivent donc être aptes à délivrer les tensions d'alimentation et de commande des tubes pendant la durée des impulsions émises et cela avec les courants convenables. Le rôle du modulateur est double, il sert à la fois de réservoir d'énergie et de commutateur de puissance.

**II.6.2- RECEPTEUR :**

A la réception, les signaux sont amplifiés au moyen d'un amplificateur hyperfréquence à faible bruit. Le signal est ensuite transposé en fréquence intermédiaire et traverse ensuite la ligne de compression qui a une fonction complémentaire de celle utilisée à l'émission (pente de fréquence - temps inverse). Le signal est ensuite détecté de façon cohérente par corrélation avec l'onde utilisée pour la génération de l'impulsion d'émission. Le résultat du mélange est constitué en général, de deux signaux vidéo fréquence en quadrature de phase.

La figure -II.15- illustre le schéma bloc de la réception.

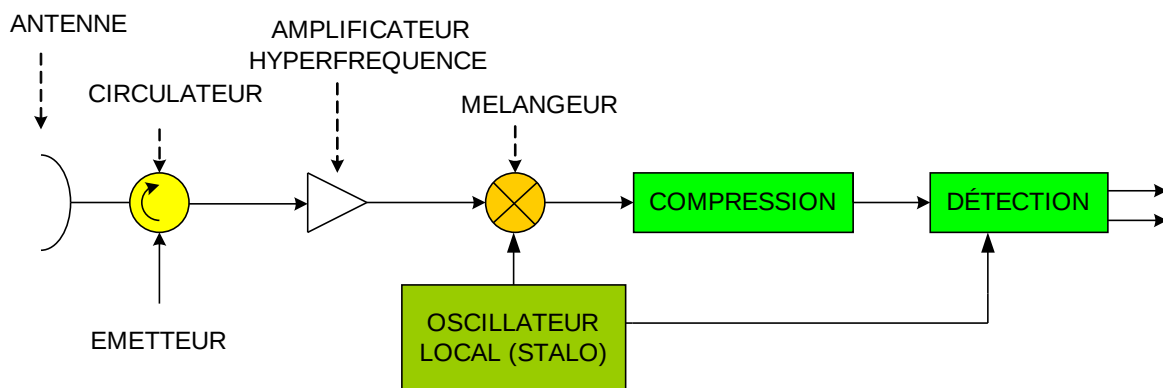


**Figure II-15 : Schéma bloc du récepteur**

### II.6.2.1- MELANGEUR :

Les mélangeurs permettent de séparer la chaîne d'amplification en plusieurs étages travaillent sur des fréquences porteuses différentes de façon à obtenir de grands gains sans couplage des étages haut et bas niveau. Cet agencement est connu sous le nom de réception **superhétérodyne**.

Le mélangeur possède trois ports, figure -II.16-. Le port R (RF in) est l'entrée par laquelle le signal radiofréquence est injecté. Le port L (LO in) représente l'entrée par laquelle

l'oscillateur local (STALO : STAbilised Local Oscillator) est appliqué et enfin la sortie I (IF Out) par laquelle sort un signal à fréquence intermédiaire.

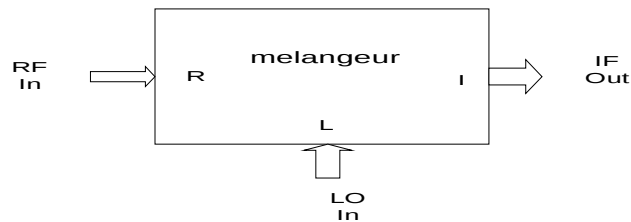


**Figure II-16 : Le mélangeur**

#### **II.6.2.2- DETECTION (démodulateur) :**

La détection s'effectue par un démodulateur. La démodulation est le processus d'extraction de signal d'information (basse fréquence) à partir d'un signal à fréquence intermédiaire. Il existe trois types de démodulateurs à savoir le démodulateur d'enveloppe, le démodulateur synchrone et le démodulateur I/Q.

Le démodulateur I/Q (In-phase and Quadrature signal), figure –II.17-, est le plus utilisé dans les systèmes radars, il récupère toutes les composantes de signal (amplitude, fréquence et phase), le démodulateur I/Q est constitué de deux démodulateurs synchrones, un compare le signal avec l'oscillateur COHO et l'autre compare le signal avec le COHO déphasé de 90°.

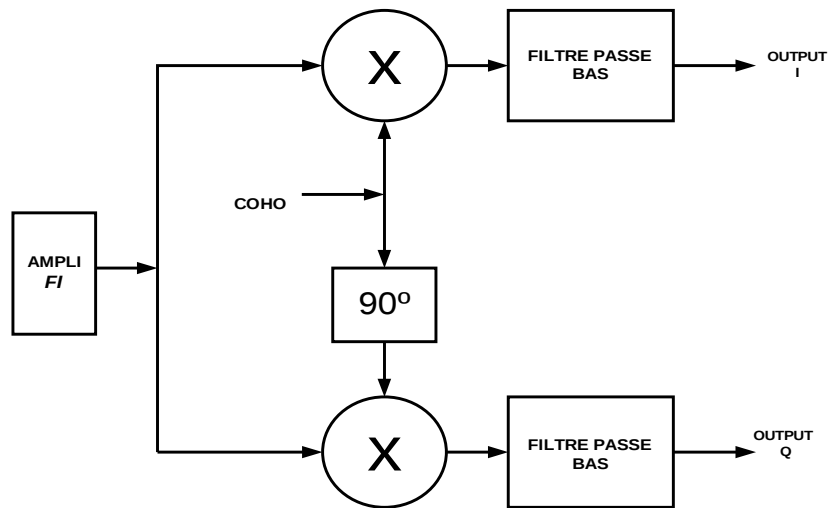


**Figure II-17 : Le démodulateur**

Le signal est récupéré à l'aide des équations suivantes :

$$V_I = V_S \cos(\Phi(t)) ;$$

$$V_Q = V_S \sin(\Phi(t)).$$

Avec :  $V_I$  est la sortie I (tension) de démodulateur.

$V_Q$  est la sortie Q (tension) de démodulateur.

$V_S$  est la tension crête du signal écho.

$\Phi(t)$  la phase de l'écho en fonction du temps.

Les deux signaux  $I$  et  $Q$  représentent complètement le signal écho ;  $I$  est la composante réel et  $Q$  est la composante imaginaire, on peut reconstruire la phase et l'amplitude de signal écho par :

$$V_S^2 = V_I^2 + V_Q^2$$

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \frac{V_Q}{V_I}$$

### II.6.3- DUPLEXEUR :

Un duplexeur est un dispositif qui, à l'émission, assure la commutation émetteur-antenne tout en laissant le récepteur découplé ; à la réception, il réalise la commutation

antenne-récepteur en découplant l'émetteur. C'est un élément essentiel du système radar car les puissances crêtes mises en jeu à l'émission sont de l'ordre de 1 à 10 MW et le récepteur pourrait être endommagé par une puissance crête de fuite de 10 à 100 mW. On voit donc qu'il faut assurer un découplage émetteur-récepteur d'au moins 90 dB.

Il existe différents types de duplexeurs. Ils utilisent souvent des tubes à gaz TR (*transmit-receive*) qui s'ionisent lorsqu'ils sont soumis à une forte puissance (ils se comportent alors comme des courts-circuits), sinon restent neutres (ils sont alors transparents).

### **Duplexeur radar à deux té magiques et à tubes TR :**

Le duplexeur qui est étudié ici, figure-II.18-, est constitué par deux té magiques dont les voies principales sont reliées deux à deux par des lignes où se trouvent des tubes TR qui sont dans des plans décalés de  $\frac{\lambda_g}{4}$  l'un par rapport à l'autre.

L'émetteur se trouve dans la voie différence du té magique  $T_1$  et l'antenne est dans la voie somme. Le récepteur est dans la voie somme du té magique  $T_2$  et il y a une charge adaptée dans la voie différence.

Une onde produite par l'émetteur se partage en opposition de phase entre les voies principales gauche et droite du **té magique**  $T_1$  figure-II.18-. Les TR s'ionisent (forte puissance à l'émission) et réfléchissent donc les ondes incidentes qui reviennent sur  $T_1$ .

L'onde qui s'est propagée sur la voie de droite a parcouru une distance supplémentaire de  $2 \frac{\lambda_g}{4}$ , Elle a donc un déphasage supplémentaire de  $\pi$ , qui s'ajoute à son déphasage initial de  $\pi$ , et la remet en phase avec l'onde qui s'est propagée sur la voie de gauche. Ces deux ondes se recombinent donc dans la voie somme du té magique  $T_1$  où se trouve l'antenne.

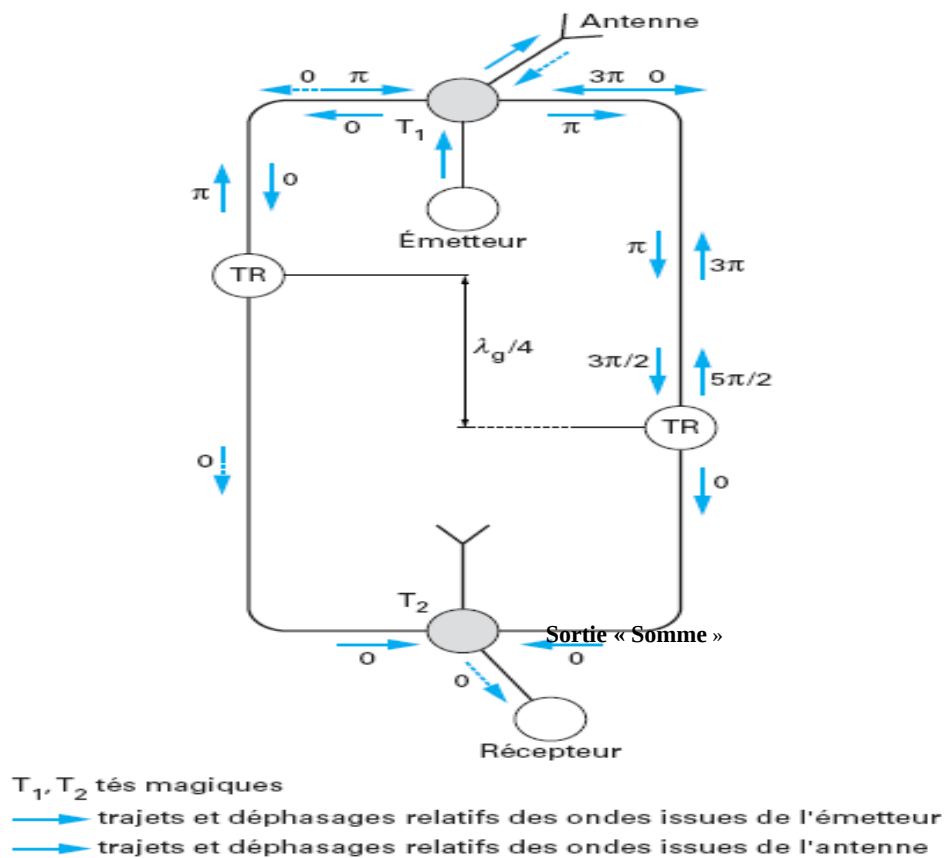


**Figure II-18 : Le duplexeur**

À la réception, l'onde se partage en phase entre les voies principales gauche et droite du té magique  $T_1$ . Les tubes à gaz TR restent transparents aux deux ondes (faibles puissances) qui parviennent en phase sur le té magique  $T_2$ . Elles se recombinent donc dans la voie somme de  $T_2$  où se trouve le récepteur.

Ce duplexeur réalise bien la commutation. Il offre aussi un excellent découplage entre l'émetteur et le récepteur.

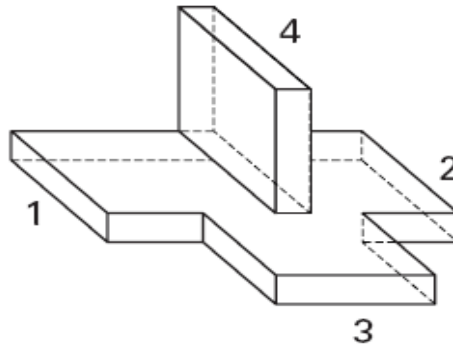
En effet, si les tubes TR laissent passer une fraction des ondes émises, affaiblie de  $A_1(\text{dB})$ , ces deux ondes, qui sont en opposition de phase, ne pourront se retrouver que sur la charge adaptée de  $T_2$  et seule une fraction, encore affaiblie de  $A_2(\text{dB})$ , pourra parvenir au récepteur. Au total, le découplage émetteur-récepteur est de  $A_1 + A_2 (\text{dB})$ . Des valeurs de 100 dB peuvent ainsi être atteintes.

## Principe de té magique :

Le fonctionnement d'un té magique est le suivant :

- une onde entrant dans la voie 3 se divise pour donner deux ondes en phase dans les voies 1 et 2 ; il n'y a rien dans la voie 4 qui est totalement découplée de la voie 3 en raison de leur orthogonalité ;
- une onde entrant dans la voie 4 se divise pour donner deux ondes en opposition de phase dans les voies 1 et 2. Pour la même raison, il n'y a rien dans la voie 3.

Le fonctionnement est réciproque, si bien que :



- des ondes entrant en phase dans les voies 1 et 2 ne peuvent se reconstituer que dans la voie 3 qui est appelée la *voie somme*.
- des ondes entrant en opposition de phase dans les voies 1 et 2 ne peuvent se recombinaer que dans la voie 4 qui est appelée la *voie différence*.

Les voies somme et différence sont donc bien découplées. En pratique, ce découplage est de l'ordre de 40 à 50 dB.

La matrice  $S$  d'un té magique parfait est :

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

#### II.6.4- ANTENNE :

L'antenne est un dispositif qui assure le couplage entre une ligne radioélectrique et l'espace environnant, figure-II.19-. Ce couplage est en générale réciproque, c'est-à-dire que le dispositif permet, soit de créer un Rayonnement à partir d'une puissance qu'on lui fournit (antenne d'émission), soit de recueillir de l'énergie quand il est plongé dans un rayonnement électromagnétique (antenne de réception).

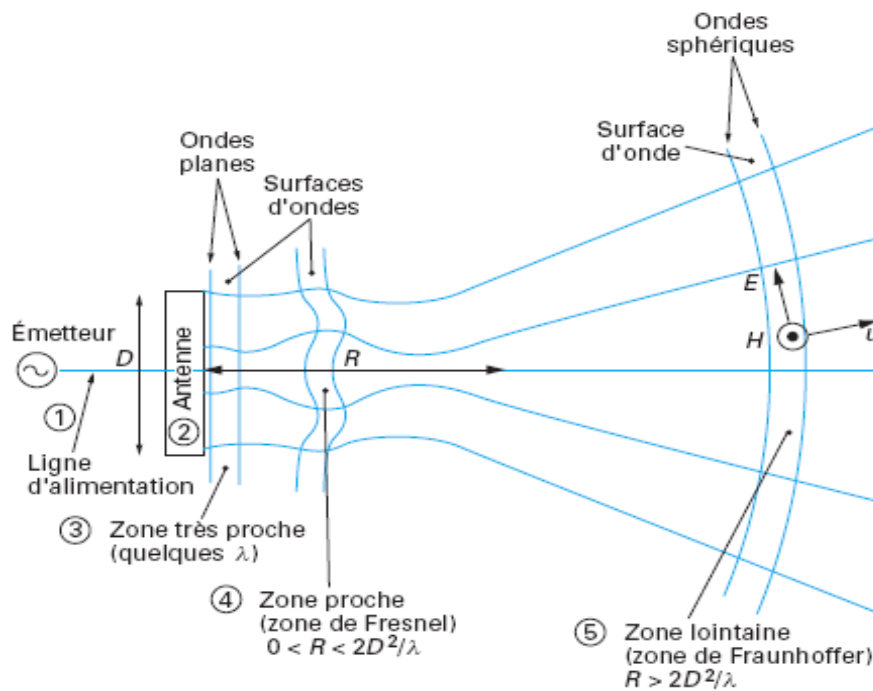


Figure II-19 : L'antenne

##### II.6.4.1- Régions d'espace :

Selon la figure-II.19-, on peut considérer 5 **régions** et préciser pour chacune le comportement de la puissance, notée  $P$ .

##### Ligne d'alimentation :

Dans cette région, la puissance  $P$  reste sensiblement constante car la ligne (micro ruban, guide d'onde...) à une atténuation très faible et il n'y a pas non plus de rayonnement. La longueur d'onde  $\lambda$  est généralement différente de la longueur d'onde en espace libre.

### **Antenne proprement dite :**

Dans cette région,  $P$  est répartie sur l'ouverture suivant différentes structures (patch, fente sur un guide, distributeur...) fournissant une onde plane sur l'ouverture de densité moyenne  $\frac{P}{S}$  ( $S$  étant la surface de l'antenne).

### **Zone très proche.**

Son épaisseur est de quelques longueurs d'onde. Dans cette région,  $P$  se propage dans l'espace sous forme d'onde plane. La densité de puissance est constante dans un petit cylindre normal à l'ouverture.

### **Zone proche.**

Cette région, appelée aussi **zone de Fresnel**, a pour épaisseur :

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

$P$  reste approximativement canalisé dans un cylindre qui a pour section l'ouverture de l'antenne. Les surfaces d'onde se transforment progressivement de plans en sphères (avec des « remous »).

### **Zone lointaine.**

On appelle aussi cette région **zone de Fraunhofer**.

$P$  est rayonné jusqu'à l'infini sous forme d'ondes sphériques centrées sur un point voisin de l'ouverture (le centre de phase). Dans une direction donnée, la puissance est constante dans un petit cône ayant cette direction pour axe, la densité de puissance (en W/sr) est une fonction caractéristique de la direction.

La densité de puissance (en W/m<sup>2</sup>) varie donc en :  $\frac{1}{R^2}$

$R$  étant la distance à l'antenne.

La longueur d'onde est celle de l'espace libre.

#### II.6.4.2- Paramètres d'antenne

##### a) -Loi d'illumination

Dans la zone lointaine, la densité de puissance rayonnée (W/sr), dans une direction de l'espace  $u$ , ne dépend plus de la distance  $R$ .

Le **champ électrique** s'écrit :

$$\mathbf{E}(u, R) = \frac{\exp(-jkR)}{R} \mathbf{F}(u) \mathbf{P}(u) \exp(j\omega t) \quad (\text{II.11})$$

On suppose que le champ électromagnétique est représenté figure-II.20-, dans le plan  $Ox, Oy$ , par la fonction scalaire  $f(x, y)$ , nulle en dehors de l'ouverture de l'antenne. On désignera cette fonction par la **loi d'illumination d'ouverture**. La fonction

$f(x, y)$  est proportionnelle au champ électrique (amplitude et phase) en  $M(x, y)$ . Il est parfois commode de prendre le coefficient de proportionnalité tel que le module au carré de  $f(x, y)$ , soit égal au flux de la densité de puissance électromagnétique en  $M$  :

$$(|f(x, y)|)^2 = \frac{1}{2} (|\mathbf{E}(x, y)|)^2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$$

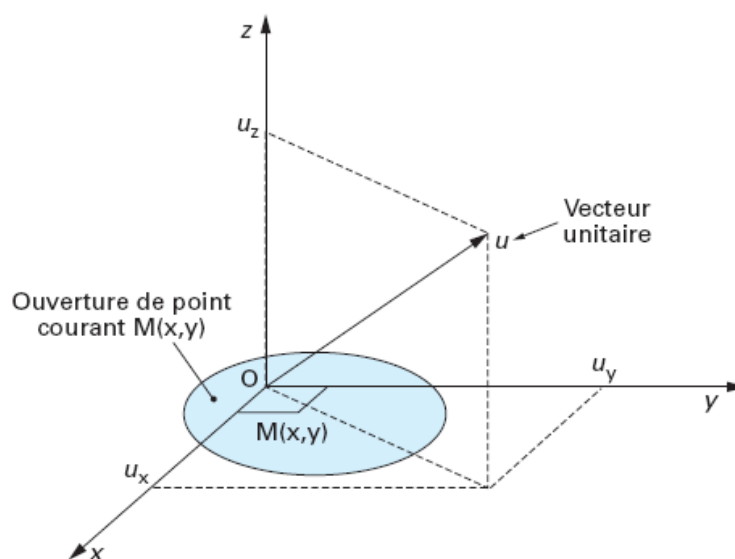


Figure II-20 : Représentation du champ électromagnétique

### b)-Diagramme de rayonnement:

Le **diagramme de rayonnement** d'une antenne est la distribution spatiale (**transformé de Fourier**) d'une grandeur (**loi d'illumination**) qui caractérise le champ électromagnétique rayonné par l'antenne. Cette distribution peut être exprimée sous forme d'une fonction  $F$  ou d'une représentation graphique à trois dimensions, comme on peut représenter le diagramme à deux dimensions par des coupes planes passant par l'origine.

Tous les diagrammes comportent plusieurs lobes, le plus grand appelé lobe principal (ou faisceau) de l'antenne, Les autres sont les lobes secondaires qui sont les sources majeures d'interférence indésirable dans les systèmes radar.

Les diagrammes sont normalisés par rapport au maximum et exprimés en décibels

$$F_{dB}(\theta) = 20 \log \frac{|F(\theta)|}{\sup (|F(\theta)|)} \quad (II.12)$$

On définit aussi **la largeur d'ouverture du faisceau** comme étant l'angle limité par les directions où le niveau de rayonnement est une fraction donnée du niveau maximal, l'angle la plus utilisée est l'ouverture à demi puissance dite à trois décibels (**3db**).

### c) -Gain

Le gain d'une antenne, dans une direction donnée, est le rapport entre la densité de puissance rayonnée par l'antenne dans cette direction et la densité de puissance qui serait rayonnée si l'antenne était isotrope (L'antenne isotrope est une antenne fictive qui rayonne la même densité de puissance quelle que soit la direction de l'espace). Le gain vaut :

$$G(u) = \frac{(|F(u)|)^2}{\frac{P}{4\pi}} \quad (II.13)$$

Avec  $(|F(u)|)^2$  puissance rayonnée dans la direction  $u$ ,  $P$  puissance alimentant dans l'antenne.

Le gain s'exprime généralement en décibels :  $G_{dB} = 10 \lg(G)$

### d)-Directivité :

Cette grandeur est le rapport de la puissance rayonnée dans une direction U à la puissance moyenne rayonnée par l'antenne :

$$D(u) = 4\pi \frac{(|F(u)|)^2}{\int (|F(u)|)^2 d\omega} \quad (II.14)$$

Les dimensions des antennes et les qualités requises sur les diagrammes (en amplitude et phase) sont telles que la partie rayonnante est constituée soit de guides à fente soit de patch « micro ruban » (cas de SEASAT et de SIR-SAT).

#### II.6.4.3- LES ELEMENT RAYONNANT :

Les réseaux réguliers comprennent généralement un grand nombre d'antennes élémentaires. Le **choix** dépend des éléments suivants :

La **polarisation** à rayonner :

- patch à double entrée, dipôles en croix pour la polarisation **circulaire**.
- dipôle simple, patch, petit cornet, fente pour la polarisation **rectiligne**.

Le type de **distributeur** :

- un guide est mieux adapté comme antenne élémentaire, si la distribution se fait en **guides d'ondes**.
- un dipôle est facile à réaliser, si la distribution est en **microstrip**.

La **technique** et l'**emplacement** du déphaseur :

- si le déphaseur est à **ferrite**, le guide d'ondes convient particulièrement bien ;
- si le déphaseur est à **diodes** implantées sur ligne microstrip, un dipôle imprimé sur le même substrat est la bonne solution.

##### II.6.4.3.1- DIPOLE :

Le dipôle est le type d'antenne le plus utilisé. Il est simple à réaliser : généralement un conducteur linéaire de longueur égale à une demi-longueur d'onde au moins. Les dipôles sont d'ailleurs les seules antennes concevables lorsque la longueur d'onde devient grande.

Considérons, la figure-II.21-, Un fil conducteur de longueur  $l$  est parcouru par un courant  $I$ . ce courant rayonne un champ électromagnétique dans tout l'espace.

Par raison de symétrie, le champ rayonné est de révolution autour de Oz.

A grande distance (devant la longueur de fil) dans une direction U caractérisée par l'angle  $\theta$ , le champ électrique rayonné est perpendiculaire à la direction U et

Contenu dans le plan (Oz, Ou). Le champ magnétique est tel que le trièdre E, H, U est un trirectangle.

L'amplitude du champ électrique au point M est :

$$E(\theta) = j 60 \pi \frac{\sin(\theta)}{r\lambda} \int_{-1/2}^{1/2} I(z) \exp \left[ \frac{-j2\pi}{\lambda} r(z) \right] dz \quad (\text{II.15})$$

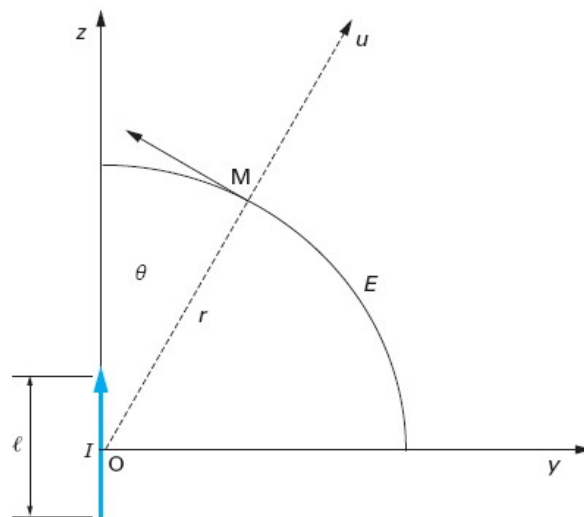


**Figure II-21**

#### II.6.4.3.2- Fente :

Cette antenne désigne un élément rayonnant formé par une fente réalisée sur une surface conductrice.

## Principe de Babinet :

Le principe de Babinet est illustré par la figure-II.22- : il y a des équivalences entre le comportement radioélectrique d'un plan conducteur infini sur lequel on a découpé une figure et cette figure, seule.

Dans le cas simple de la figure, on compare une fente et un dipôle de mêmes dimensions.

On montre que :

- la fente à le même diagramme de rayonnement en amplitude, donc la même directivité que le dipôle ;
- les plan H et E sont inversés : le plan E est Oz, Oy pour le dipôle et Ox, Oy pour la fente ;
- les impédances sont liées par la relation :

$$Z_1 Z_d = \frac{Z_0^2}{4} \quad (\text{II.16})$$

Avec :  $Z_1$  impédance de la fente.

$Z_d$  : impédance de dipôle équivalent.

$Z_0$  : impédance de vide ( $337\Omega$ ).

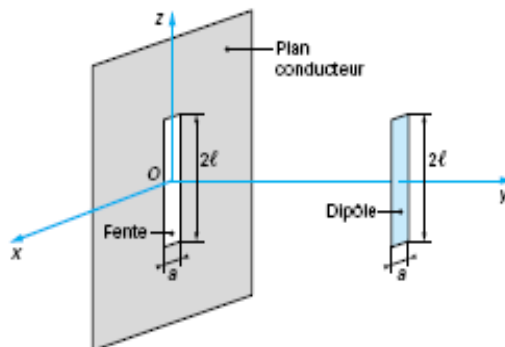


Figure II-22 : Le principe de Babinet

Les fentes sont très utilisées comme éléments rayonnants associés à un guide, spécialement le guide rectangulaire. Les fentes peuvent être réalisées soit sur le grand côté, soit sur le petit côté du guide.

#### II.6.4.3.3- PATCH :

Il n'y a pas, pour le moment, de terme français établi par l'usage pour désigner l'antenne élémentaire dont le nom anglais est « patch ».

On trouve les mots « antenne plaquée » ou « antenne imprimée » pour désigner tout réseau utilisant des antennes élémentaires du type « patch ». Le terme « pastille » est parfois utilisé. Nous allons utiliser ici le mot anglais.

Le **patch** a une ou plusieurs couches de plans Conducteurs gravés, collés sur des plaques de diélectrique. En effet, par un procédé d'usinage très simple, très précis et très répétitif, la photogravure. On réalise à la fois les lignes d'alimentation et les antennes élémentaires dans une technologie légère.

La figure -II.23- suivante donne la géométrie d'un patch alimenté par une ligne coaxiale.

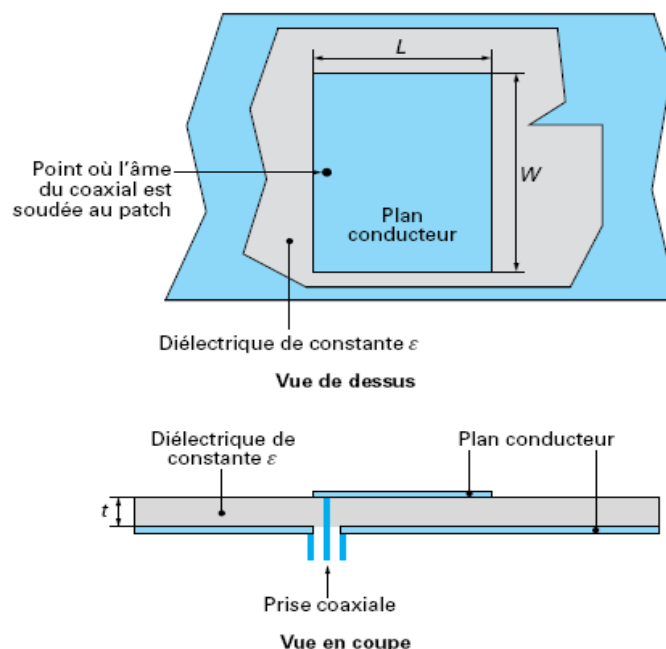


**Figure II-23 : Le patch**

La largeur  $W$  détermine le diagramme de rayonnement et l'impédance d'entrée du patch. La longueur  $L$  de l'antenne patch est de  $1/2$  longueur d'onde.

Les antennes patches sont très utilisées en radar à cause de leur faible coût et de la simplicité de construction.

#### II.6.4.4- Réseaux d'antennes:

Beaucoup d'antennes sont constituées d'un ensemble d'antennes élémentaires réunies par un distributeur, ce sont les réseaux ils permettent d'obtenir des lois d'illumination sophistiquées et, surtout, en associant un déphaseur à chaque source élémentaires.

Il existe une grande variété de réseaux, à savoir : Réseaux réguliers, réseaux linéaires et réseaux circulaires.

Les réseaux utilisés principalement en radar sont les **réseaux linéaires**, on peut les classer en deux types :

- **Les réseaux dispersifs** : figure-II.24-, qui ont une direction de rayonnement maximal qui varie avec la longueur d'onde, les sources de rayonnements sont alimentées successivement à partir d'une ligne d'alimentation.

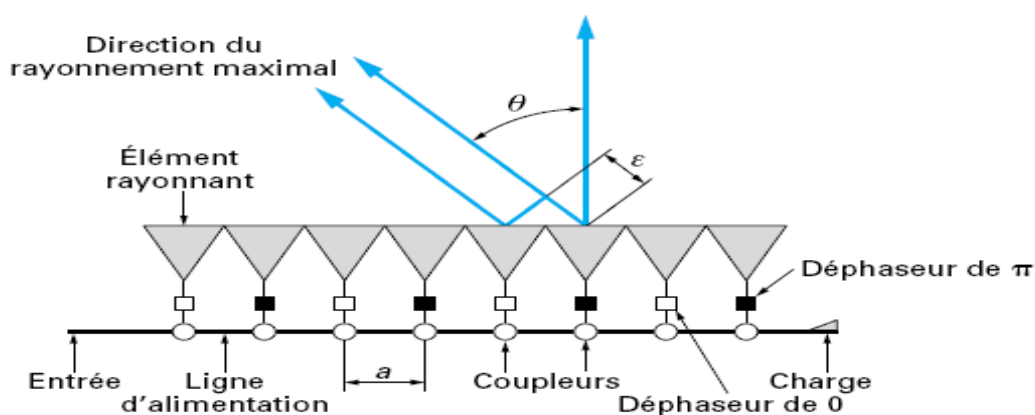


Figure II-24 : Les réseaux dispersifs

- **Les réseaux non dispersifs** : figure-II.25-, ceux dont la direction de rayonnement maximal ne dépendent pas de la longueur d'onde. L'alimentation des éléments rayonnant est faite en parallèle.

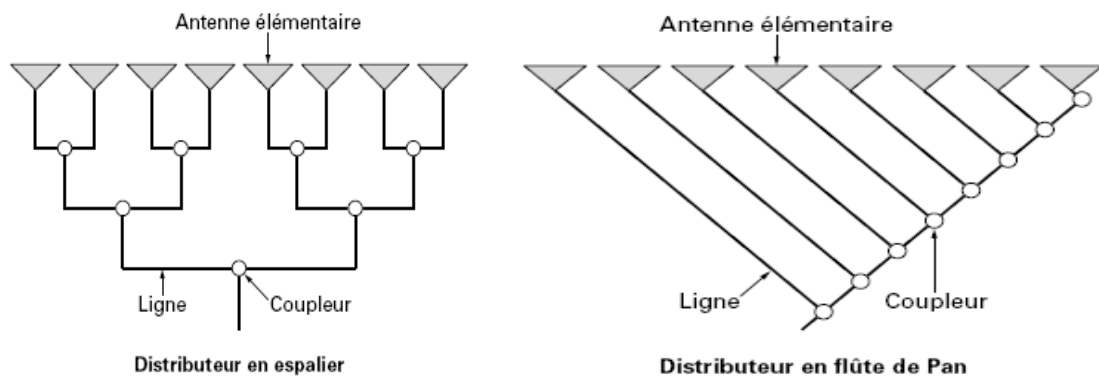


**Figure II-25 : Les réseaux non dispersifs**

#### II.6.4.4.1)-Exemples de réseaux linéaires dispersifs utilisé en radar:

##### a)-Guides à fentes

Les guides à fentes sont des réseaux linéaires dispersifs très utilisés, parce qu'ils sont faciles à réaliser et donc économiques, à faibles pertes ; ils peuvent de plus fournir des diagrammes à très faibles lobes de réseau.

Si le balayage n'est pas une propriété recherchée, il faut tenir compte du fait que la direction du faisceau varie avec la fréquence (sqint).

Les fentes peuvent être réalisées soit sur le grand côté, soit sur le petit côté.

##### a.1)-Guides à fentes sur le grand côté :

La figure –II.26, représente un guide avec fentes sur le grand côté du guide.

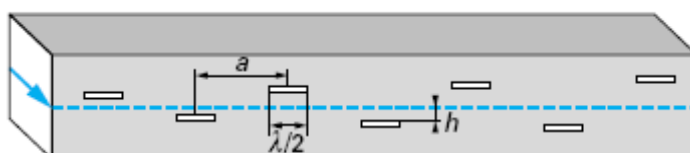


**Figure II-26 : Guides à fentes sur le grand côté**

Les fentes sont parallèles à son axe. La distance  $h$  contrôle le couplage du guide à la fente ; le couplage est nul lorsque la fente est sur l'axe ( $h = 0$ ) et croît avec  $h$ . Le déphasage de  $\pi$  est réalisé en alternant les fentes par rapport au plan médian.

La fente est sélective, c'est-à-dire qu'elle ne rayonne bien et ne couple bien qu'à une fréquence telle que sa longueur est la moitié de la longueur d'onde dans le vide et dans une faible bande autour de cette fréquence.

Si le guide est long (quelques dizaines de  $\lambda$ ), la dynamique des coupleurs (rapport entre le couplage le plus élevé et le couplage le plus faible) est grand.

**a.2)-Guides à fentes sur le petit côté : figure –II.27.**

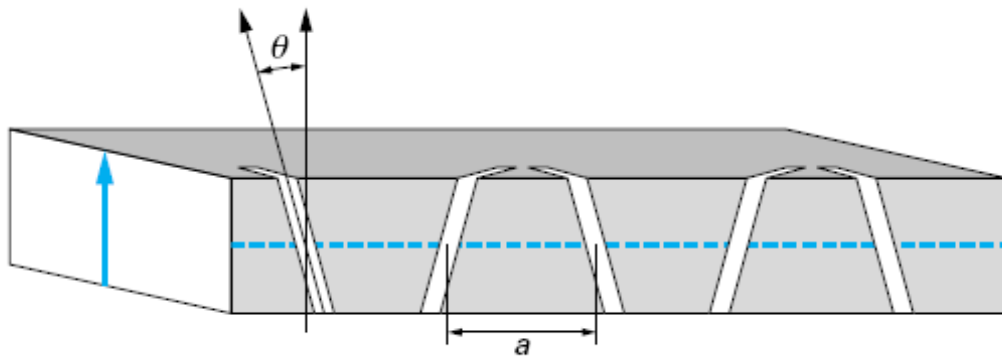
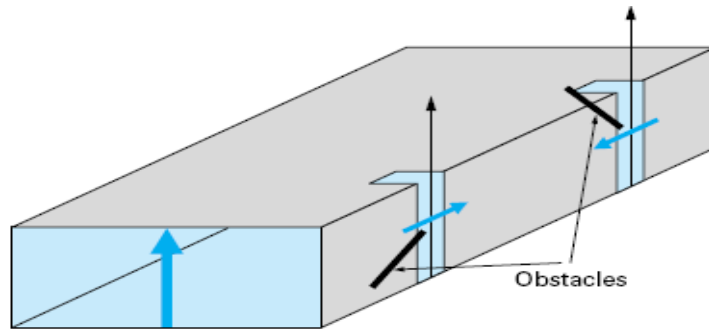


**Figure II-27 : Guides à fentes sur le petit côté**

Le pas  $a$  est légèrement inférieur ou légèrement supérieur à la demi-longueur d'onde dans le guide. L'angle  $\theta$  contrôle le couplage du guide à la fente ; le couplage est nul lorsque la fente est perpendiculaire à l'axe du guide ( $q = 0$ ) et croît avec  $\theta$ .

Le déphasage de  $\pi$  est réalisé en alternant les fentes par rapport à la normale à l'axe. Un **inconvénient** de cette structure est qu'elle rayonne aussi en polarisation croisée. On peut y

remédier en introduisant, à l'intérieur du guide, un obstacle réalisant le couplage avec des fentes.



### Fentes sur le petit côté d'un guide (couplage par obstacles)

#### b)-Réseaux d'antennes à micro ruban (réseau patch) :

Le grand avantage des micro-ruban est que la division et la combinaison des puissances et l'adaptation des impédances est très simple à réaliser. La figure –II.28, présente un simple réseau micro ruban (patch).

Exemple : On suppose que l'impédance d'alimentation est  $50\Omega$ , et celle de l'élément rayonnant (patch)  $128\Omega$ . La première division/combinaison constitue de deux lignes de  $100\Omega$  branchées à une alimentation de  $50\Omega$ . Un tronçon de ligne de longueur  $1/4 \lambda$  transforme l'impédance de  $100\Omega$  à  $50\Omega$ , après branchement à une ligne de  $100\Omega$ , il y'a une section de  $1/4 \lambda$  de  $113\Omega$  afin de réaliser une adaptation avec l'élément rayonnant de  $128\Omega$ .

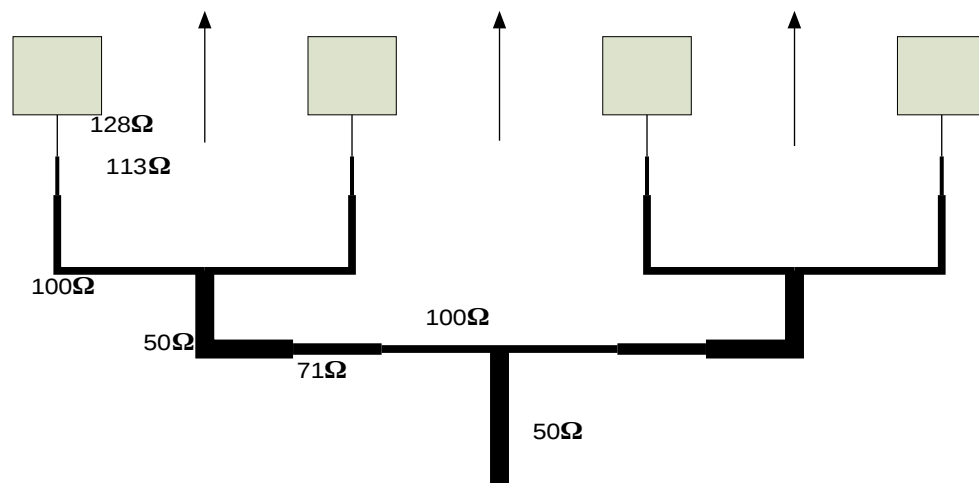


Figure II-28 : réseau patch

# CHAPITRE I

## Généralités

## CHAPITRE II

Principe et description du SAR

## CHAPITRE III

Traitement SAR

### III.1- SIGNAL DELIVRE PAR L'ANTENNE : [9]

La forme de l'onde émise par le radar est composée de  $N$  impulsions de durée  $\tau_p$ , et de bande passante  $\Delta f$ . Ces impulsions sont espacées d'un intervalle  $\Delta\tau_p$  en temps. La forme mathématique de la  $n^{\text{ième}}$  impulsion est :

$$S_n(t) = a(t) \cos \left( 2 \left( ft + \frac{1}{2} \alpha t^2 \right) \right) \quad (\text{III.1})$$

avec  $a(t)$  l'enveloppe des impulsions,  $f$  la fréquence,  $\alpha$  coefficient de modulation de la fréquence tel que:  $\alpha = \frac{\Delta f}{\tau_p}$ , et  $t$  le temps mesuré à partir du centre de l'émission d'une impulsion ( $t_c = n \Delta\tau_p$ ) tel que :  $-\tau_p/2 \leq t \leq \tau_p/2$ .

### III.2- TRAITEMENTS SAR: [9], [15]

Il faut définir la notion de résolution avant de voir plus en détail les traitements effectués sur le signal rétrodiffusé.

●

#### Résolution en distance :

La résolution en distance, figure-III.1-, est définie comme étant la distance minimale qui permet de distinguer séparément deux cibles voisines par un même système radar.

Considérons deux cibles identiques A et B, telles que la cible A soit plus proche de l'axe du nadir que la cible B. Si le signal rétrodiffusé par la cible A est capté par le radar suffisamment en avance par rapport au signal rétrodiffusé par la cible B, alors ces deux cibles apparaîtront distinctement l'une de l'autre. La résolution minimale entre ces deux cibles est obtenue par l'expression :

$$\delta R_d = \frac{C\tau_p}{2\sin\theta} \quad (\text{III.2})$$

Avec  $C$  la vitesse de la lumière.

Pour obtenir une fine résolution, la durée d'une impulsion  $\tau_p$  doit alors être aussi faible que possible. Or, cette impulsion doit pouvoir être générée avec une énergie suffisamment forte, afin de capter un signal rétrodiffusé suffisamment important vis-à-vis du bruit.

Pour avoir toutes ces conditions, la technique de compression fondée sur l'émission d'un chirp, est couramment employée ce qui permet d'obtenir une résolution en distance bien plus fine :

$$\delta R_d = \frac{c}{2 \Delta f \sin \theta} \quad (\text{III.3})$$

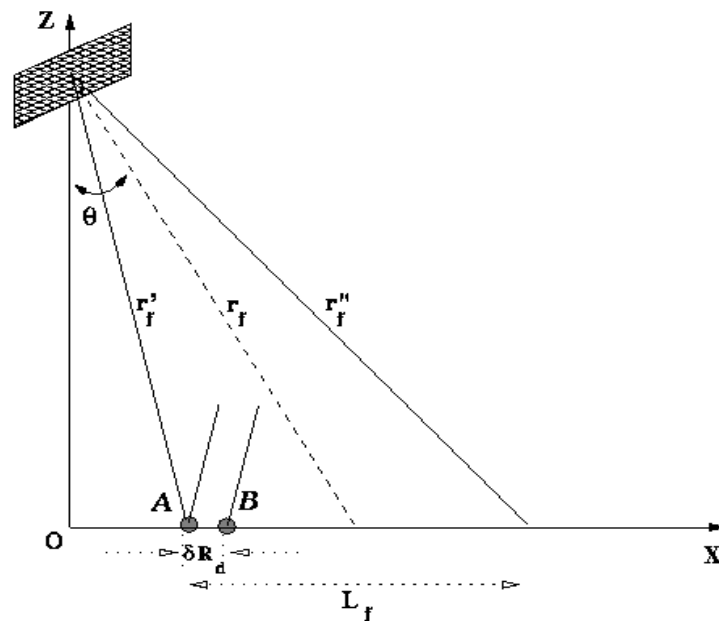


Figure III.1 : Résolution en distance

•

## Résolution en azimuth

En ne prenant pas en compte la synthèse d'ouverture qui consiste à utiliser plusieurs positions de l'antenne pour construire l'image, la résolution azimutale  $\delta R_a$  se définit comme étant la distance au sol entre deux cibles, appartenant à un même axe parallèle à la trajectoire du satellite. Ces deux cibles seront donc vues distinctement par le système radar à condition qu'elles ne soient pas illuminées en même temps par le faisceau Figure-III.2-, De ce fait, la résolution azimutale correspond à la largeur de l'empreinte au sol du faisceau. Cependant, l'intérêt d'utiliser la synthèse d'ouverture permet de considérer l'ensemble des réponses d'une

même cible lors de son passage dans le lobe de l'antenne, et d'obtenir une résolution en azimuth plus fine de la forme :

$$\delta R_a = \frac{L_{SAR}}{2} \quad (III.4)$$

Cette relation est la propriété fondamentale du radar à ouverture synthétique. Elle à la qualité d'être indépendante de la longueur d'onde, de la vitesse du satellite et de son altitude. L'unique paramètre est la longueur de l'antenne. Il semblerait que l'on ait intérêt à la choisir très petite. Mais, il existe certaines conditions à respecter, en particulier sur la surface de l'antenne SAR, puisque l'utilisation d'une antenne extrêmement petite poserait des problèmes au niveau du bilan énergétique.

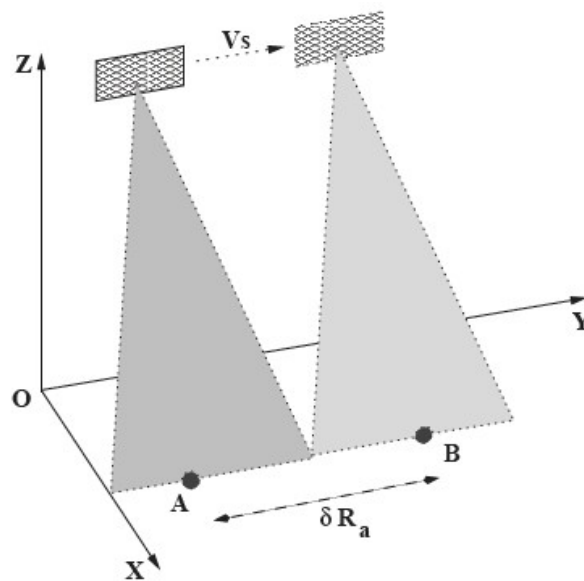


**Figure III-2 : Résolution en azimuth**

### III.2.1-Traitement de signal reçu (rétrodiffusé) : [9], [5]

Cette partie présente succinctement les divers traitements réalisés sur le signal reçu par le radar. Comme nous l'avons vu précédemment, le radar émet des impulsions dont l'expression est donnée par l'équation (III.1). Après interaction avec les divers éléments du terrain, une partie de l'énergie est rétrodiffusé vers le satellite. Le signal rétrodiffusé  $r_n(t)$  provenant de la  $n^{ième}$  impulsion émise se met alors sous la forme :

$$\mathbf{r}_n(\mathbf{t}) = \mathbf{A} \mathbf{s}_n(\mathbf{t} - \mathbf{t}_0) \quad (\text{III.5})$$

Avec  $\mathbf{t}_0$  le temps de propagation aller-retour de l'onde entre le radar et le sol. Ce temps vaut  $2\mathbf{r}_0/\mathbf{c}$ , avec  $\mathbf{r}_0$  la distance séparant le radar et le sol, dépendant du temps  $\mathbf{t}$  puisque cette distance varie d'une impulsion à l'autre avec le déplacement du radar le long de sa trajectoire.  $\mathbf{A}$  est une constante liée essentiellement à la nature et à la réflectivité du terrain, mais également au signal émis, ainsi qu'aux pertes durant le trajet de l'onde et aux divers gains en émission et réception de l'antenne. Cette constante donnera la valeur radio métrique du pixel de l'image.

Généralement, on considère les signaux émis et reçus complexes, que l'on notera respectivement  $\hat{\mathbf{S}}_n(\mathbf{t})$  et  $\hat{\mathbf{r}}_n(\mathbf{t})$ . Le signal émis  $\hat{\mathbf{S}}_n(\mathbf{t})$  s'écrit alors :

$$\hat{\mathbf{S}}_n(\mathbf{t}) = \mathbf{a}(\mathbf{t}) \exp(2\pi j (f \mathbf{t} + \frac{1}{2} \alpha \mathbf{t}^2)) \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant  $\hat{\mathbf{S}}_n(\mathbf{t})$  par son expression, le signal reçu devient donc:

$$\hat{\mathbf{r}}_n(\mathbf{t}) = \mathbf{A} \exp(-2\pi j f \mathbf{t}_0) [\underbrace{\mathbf{a}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_0)}_{\text{azimut}} \underbrace{\exp(2\pi j (f \mathbf{t} + \frac{1}{2} \alpha (\mathbf{t}-\mathbf{t}_0)^2))}_{\text{distance}})] \quad (\text{III.7})$$

Cette expression montre le découplage des réponses du terrain en azimut et en distance que l'on notera respectivement  $\hat{\mathbf{r}}_n^a(\mathbf{t})$  et  $\hat{\mathbf{r}}_n^d(\mathbf{t})$ . Dans ce qui suit, nous présentons les traitements en site (ou compression d'impulsion) et en azimut, qui permettent ainsi d'obtenir la forme générale de la fonction image.

### III.2.1.a- Traitement en site :

Considérons la  $n^{\text{ième}}$  impulsion émise, à l'instant  $\mathbf{t}_n$ , le signal en site est :

$$\hat{\mathbf{r}}_n^d(\mathbf{t}) = \mathbf{a}(\mathbf{t}-\mathbf{t}_0) \exp(2\pi (f \mathbf{t} + \frac{1}{2} \alpha (\mathbf{t}-\mathbf{t}_0)^2)) \quad (\text{III.8})$$

Par l'utilisation d'un filtre adapté, ce signal subit une détection, réalisée en le corrélant avec la réplique conjuguée du signal émis. La réponse  $\hat{g}_d(t_d)$  à ce filtre est donc :

$$\hat{g}_d(t_d) = \frac{1}{t_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{r}_n^d(t) \hat{S}_n^*(t - t_d) dt \quad (III.9)$$

Par calcul de l'intégrale, cette réponse se met sous la forme d'un sinus cardinal, figure-III.3-, pondéré par l'expression d'une fenêtre triangulaire centrée en  $t_c$  et de largeur  $2t_p$ .

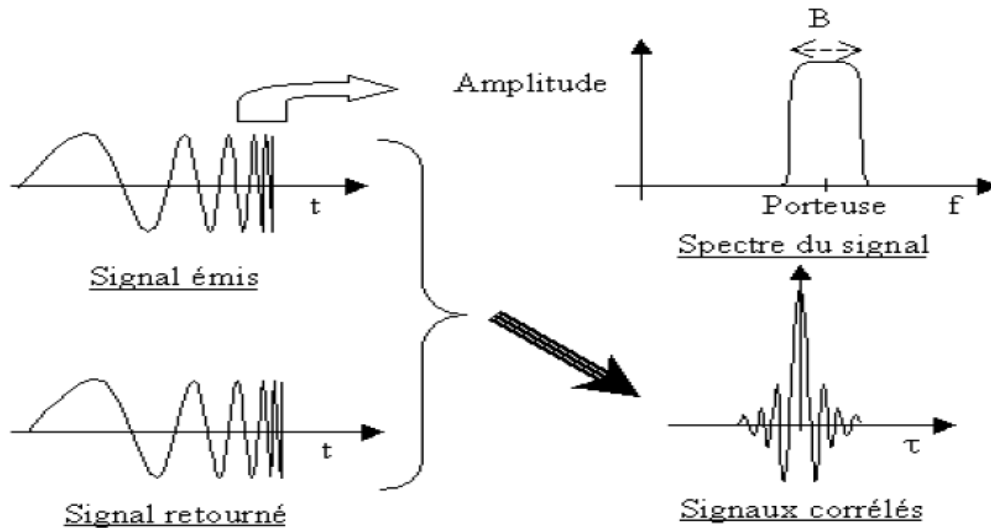


**Figure III-3 : principe du filtrage adapté ou de la compression d'impulsion**

L'amplitude de cette réponse est maximale pour  $t_d = t_0 = \frac{2r_0}{c}$ . Or, nous avons vu précédemment, que cette distance  $r_0$  séparant le radar du sol illuminé varie en fonction du temps  $t$  d'émission. Ceci implique que le temps  $t_0$  de propagation aller-retour de l'onde dépend également de ce temps  $t$  d'émission. Cette dépendance temporelle entraîne la répartition sur plusieurs lignes de la réponse du sol illuminé, appelée migration en distance. Une fois la migration corrigée, il est possible de considérer la différence  $(t_0 - \tau_d)$  comme constante dans le cas des satellites.

Après ce traitement en site, et en posant  $t_d = \frac{2r}{c}$ , le signal reçu  $\hat{r}^{(d)}$  approximé devient donc:

$$\hat{\mathbf{r}}^{(d)}(\mathbf{r}, t) = A \exp(2\pi f t_0(t)) \text{Sinc } \pi \alpha \tau_p(t_d - t_0) \quad (\text{III.10})$$

#### IV.2.1.b- Traitement en azimut :

A la  $n^{\text{ième}}$  impulsion émise, le signal en azimut s'écrit :

$$\hat{\mathbf{r}}_n^a(t) = \exp(2\pi j f t_0(t)) \quad (\text{III.11})$$

Le traitement en azimut va prendre en compte la variation de  $t_0$  d'une impulsion à l'autre. Comme pour le traitement en site, ce traitement consiste à réaliser un filtrage adapté. La réponse azimutale s'écrit alors :

$$\hat{\mathbf{g}}_a(t_a) = \frac{1}{T_a} \int_{-\frac{T_a}{2}}^{+\frac{T_a}{2}} \hat{\mathbf{r}}_n^a(t) \hat{\mathbf{r}}_n^{a*}(t - t_a) dt \quad (\text{III.12})$$

En considérons le temps  $t_0$  sous la forme suivante :

$$t_0(t) = \frac{2r_0(t)}{c}$$

et en utilisant le développement limité de la distance  $r_0(t)$  séparant le radar du sol considéré :

$$r_0(t) = r_0^{(0)} + r_0^{(1)}t + r_0^{(2)}t^2 + 0t^3$$

avec  $r_0^{(0)}$  la distance radiale séparant le radar du sol,  $r_0^{(1)}$  la vitesse radiale, et  $r_0^{(2)}$  le terme d'accélération radiale tel que :

$$r_0^{(2)} = \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{r_0^{(0)}}.$$

La réponse azimutale (III.12) est alors approximé à :

$$\hat{\mathbf{g}}_a(t_a) = \exp\left(\frac{2\pi j}{\lambda}(r_0^{(1)} t_a)\right) \text{Sinc} \left(\frac{4\pi}{\lambda} r_0^{(2)} t_a T_a\right)^2 \quad (\text{III.13})$$

Avec  $T_a$  le temps d'éclairement du terrain considéré.

Suite au traitement en azimut, l'enveloppe  $C$  du signal reçu  $\hat{\mathbf{r}}^{(d,a)}$  s'écrit :

$$C(\hat{r}^{(d,a)}(t_d, t_a)) = \text{Sinc } \pi \alpha \tau_p(t_d - t_0) \text{Sinc} \left( \frac{4\pi}{\lambda} r_0^{(2)} t_a T_a \right) \quad (\text{III.14})$$

Le module du signal aura donc la forme d'un sinus cardinal bidimensionnel, figure-III.4-. Ce module donne ainsi, directement la valeur du pixel de l'image radar dans le cas d'un écho isolé. Tous les pixels correspondant à chaque cible sont ensuite répartis sur une grille rectangulaire, formant ainsi l'image radar.

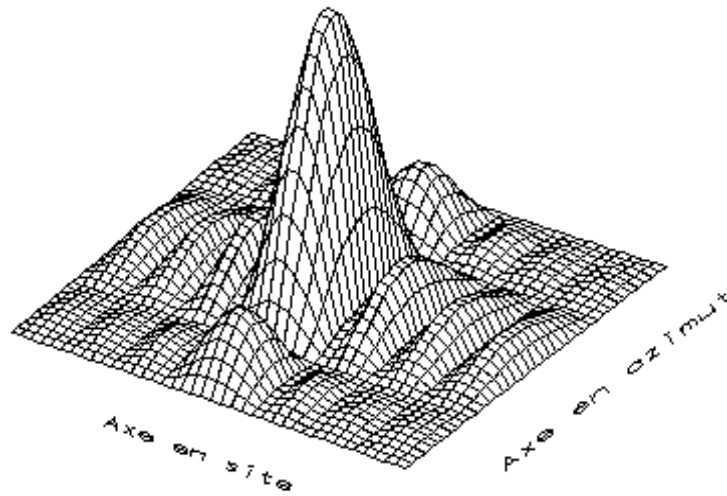


**Figure III-4 : Représentation de la réponse impulsionnelle du signal reçu par le radar après traitement en site et en azimuth**

### **III.3- ACQUISITION ET PRESENTATION DES DONNEES SAR : [12]**

L'antenne de radar est dirigée légèrement en bas et fait un angle relativement fixe de 90° avec le chemin de vol, figure-III.5-. Comme l'avion progresse, les champs de faisceau traversent un large bandage de la terre parallèle au chemin de vol (fauchée). Seulement une partie relativement étroite de ce bandage est d'intérêt immédiat.

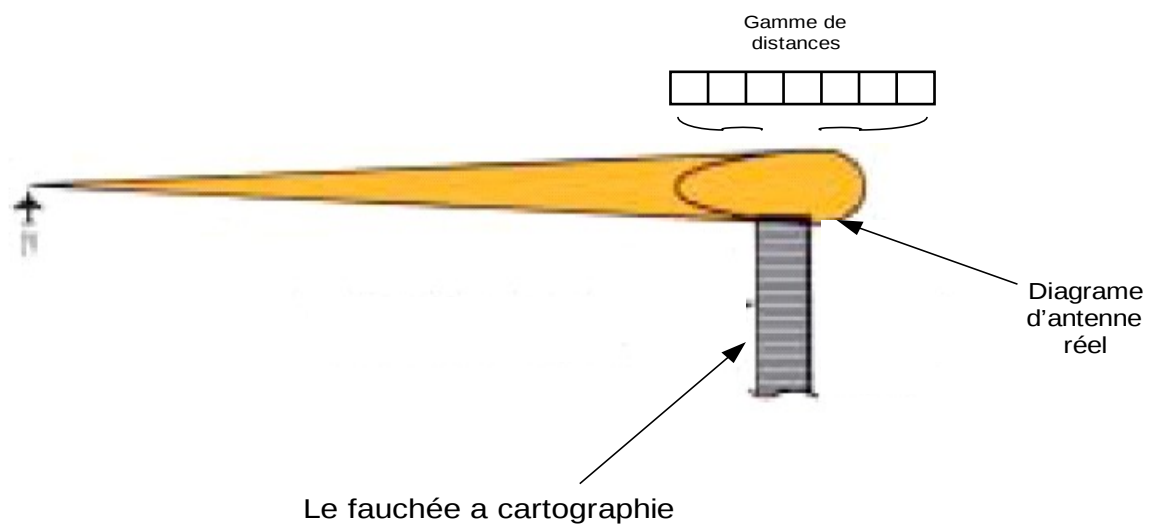


**Figure III-5 : Acquisition de données**

Dans cet exemple on exige que la terre dans cette bande soit tracée avec une résolution en distance d'environ 50 pieds, à une distance (radar-cible) de 8 milles, notre nécessité hypothétique est que le SAR synthétise une antenne réseau approximativement de 50 pieds de longueur.

La vitesse au sol de l'avion, indiquons, est de 1000 pieds par seconde et le PRF est 1000 impulsions par seconde. En conséquence, chaque fois que le radar transmet une impulsion, le centre de l'antenne de radar avance d'un pied (correspond au pas de réseau synthétique) le long du chemin de vol. Cette ligne synthétique peut être considérée comme une antenne réseau de 50pieds composé d'antennes élémentaires.

Les retours de 50 impulsions transmises consécutives doivent être additionnés. On fournit une banque de casiers de distance qui envergures justes l'intervalle de distance de 1 mille tracé, figure-III.5-Après chaque transmission, le retour entier de chaque range de résolution incrémente cet intervalle, puis ajoute la nouvelle rangé aux casiers appropriés, cette méthode de traitement des signaux de SAR s'appelle traitement ligne par ligne.

Pour illustrer plus le concept du traitement ligne par ligne, considérer le cas où une carte de  $N_a \times N_r$  de taille ( $N_a$  est le nombre de cellules d'azimut, et  $N_r$  est le nombre de casiers de distance). Par conséquent, les colonnes se rapportent à des cellules d'azimut, et les rangées se rapportent à des cellules distance.

Pour chaque impulsion transmise, les échos des casiers consécutifs en distance sont enregistrés séquentiellement dans la première rangée de MAP. Une fois la première rangée est complètement rempli (c.-à-d., des retours de tous les casiers de distance ont été reçus), toutes les données (dans toutes les rangées) sont décalées en bas d'une rangée avant la transmission de la prochaine impulsion. Ainsi, une ligne de CARTE est produite pour chaque impulsion transmise.

En conséquence, des retours de la première impulsion transmise seront situés dans la rangée inférieure de la CARTE, et les retours de la dernière impulsion transmise seront dans la première rangée de la CARTE.

Comme tout le processus de formation de réseau synthétique est comparativement lent, les données stockées dans la mémoire d'affichage sont à plusieurs reprises balayées à un taux élevé et présentées comme une image continue sur un afficheur de type- TV.

L'essentielle, des opérations sont décrites dans la figure –III.6–.

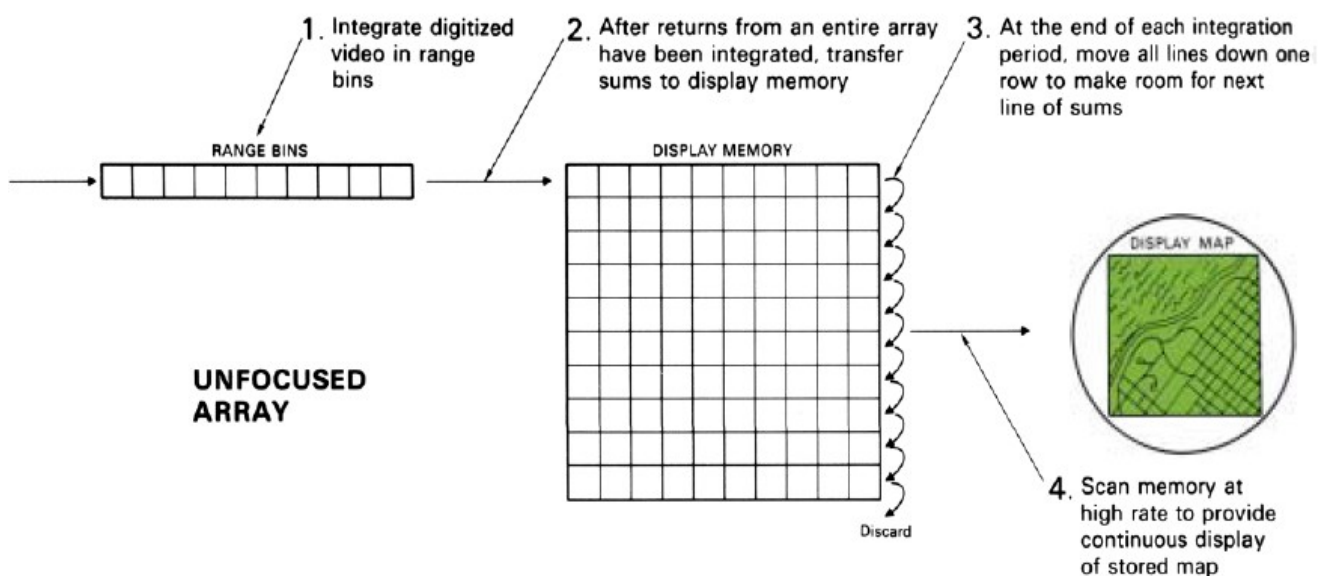


**Figure III-6 : Interprétation de données**

### III.3.1- Caractéristiques de l'image : [5]

L'imageur radar ne fournit pas une image mais deux images, une image d'amplitude et une image de phase (ou plus s'il y a une information de polarisation). Toutefois, seule la radiométrie constitue une information naturellement appréciable. L'emploi du terme "image radar " désigne donc généralement l'image d'amplitude.

#### ***Dimensions :***

Le système d'acquisition échantillonne et numérise les signaux reçus. Le signal est donc quantifié et discrétisé. Le nombre d'étages de quantification est généralement de quelques bits. La largeur de l'image en distance est caractérisée par sa fauchée, en revanche la taille en azimuth ne sera limitée, que par le temps total maximum d'acquisition, c'est à dire par des contraintes de mémoire pour les systèmes embarqués, et par la bande passante du canal de retransmission des données.

#### ***Pas entre pixels :***

En azimuth, le pas entre pixels est évidemment inhérent à la PRF et à la vitesse de progression du lobe principal d'éclairement dans la direction azimuthale. Si  $v_p$  est la norme de la vitesse relative du porteur par rapport au sol, c'est à dire sa vitesse dans la direction de l'azimut :

$$\Delta_{azimt} = \frac{v_p}{PRF}$$

En distance, c'est la fréquence d'échantillonnage qui est contraignante. Un facteur 2 intervient dans le pas de résolution, puisque la distance séparant le radar de la cible est parcourue deux fois (aller - retour). En outre, il faut prendre en compte l'angle d'incidence locale de l'onde (par rapport à la verticale) pour obtenir la résolution projetée au sol :

$$\Delta_{distance\ au\ sol} = \frac{c}{2F_e \sin \theta_i}$$

**Remarque :** Le pas entre pixels dans l'axe des distances, dépend véritablement au niveau du sol de l'angle d'incidence local effectif entre la verticale du point au sol et l'onde. En conséquence, le **pas de pixel varie en distance**.

### **III.4- LE TRAITEMENT DE SYNTHÈSE : [5]**

#### **III.4.1- Corrections des migrations :**

Le procédé de compression en azimuth consiste à rassembler pour chaque cible l'information étalée en azimuth. Cette technique exige une localisation précise des différentes contributions dans l'image. Or celles-ci sont souvent étalées en distance.

Ce phénomène est appelé **migration**. Il doit être corrigé avant la compression en azimuth si l'on veut que celle-ci s'effectue correctement.

##### **a. Migrations paraboliques :**

La distance cible-antenne varie le long du trajet. Ce phénomène a bien entendu des répercussions sur l'image et les contributions doivent donc être réalignées, figure-III.7-.

##### **b. Migrations linéaires :**

Une migration linéaire des échos peut être observée dans certaines circonstances à savoir :

- L'antenne ne pointe pas tout à fait dans la direction perpendiculaire à la trajectoire (à cause par exemple du mouvement de la terre durant l'acquisition de l'image. ext...) Ce qui revient à ajouter une migration linéaire à la migration parabolique.
- Le porteur ne se déplace pas tout à fait à distance constante du sol (Orbite de satellite excentrée, imprécision de trajectoire du porteur). Cette variation de distance est généralement approchée par une migration linéaire sur l'image.

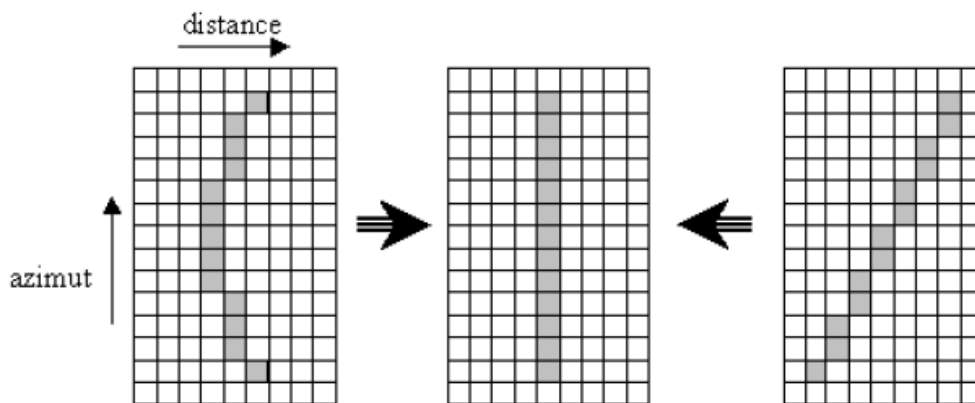


**Figure III-7 : Migrations parabolique et linéaire corrigées**

La migration linéaire peut donc toujours être assimilée à une mauvaise orientation de l'antenne, ce que l'on caractérise par un " angle de dépointage " avant ou arrière.

#### **III.4.2- Corrections radiométriques :**

La radiométrie d'une image radar pose de sérieux problèmes de représentation. Les importantes variations d'amplitude d'une image radar contribuent à rendre difficile sa visualisation et son interprétation sans traitement préalable. Ces phénomènes sont liés à la technologie radar ou au traitement de synthèse :

- Le diagramme d'antenne n'est pas constant dans la direction de visée. Dans les directions de début et fin de fauchée, la puissance émise et la sensibilité de l'antenne est donc plus faible. Cela induit des réductions d'amplitudes à la distance proximale.
- La puissance de l'onde est inversement proportionnelle au carré de la distance et donc théoriquement, la radiométrie diminue également avec la distance, mais en pratique, les distances sont telles que ces variations sont imperceptibles.

- Chaque point de l'image synthétisée est la somme des contributions répartie en distance et en azimuth. Les points situés en bord d'image ne bénéficient donc que d'une partie de l'information. La radiométrie du bord de l'image est donc moins importante.

### III.4.3- Corrections géométriques :

#### Point de focalisation :

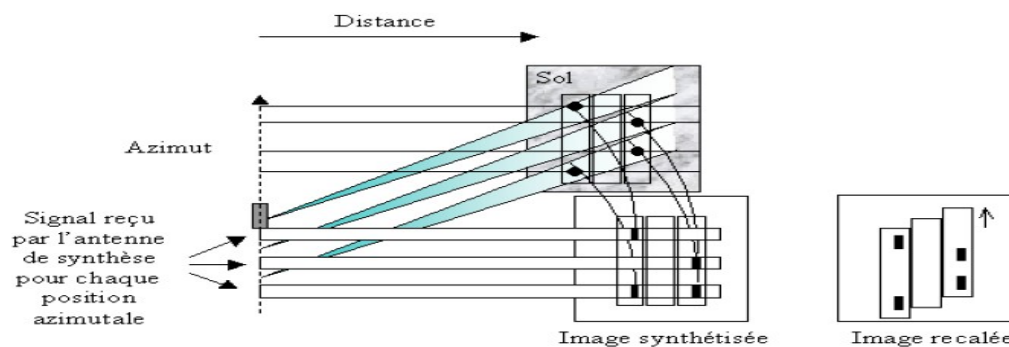


**Figure III-8 : distorsion de l'image due au dépointage avant ou arrière de l'antenne**

Le traitement de focalisation que ce soit en distance ou en azimuth, pose la question du point de focalisation. En quel point allons-nous rassembler toute l'information étalée d'une cible? En distance, ce choix produit un décalage systématique, l'image peut donc être facilement recalée sur un repère.

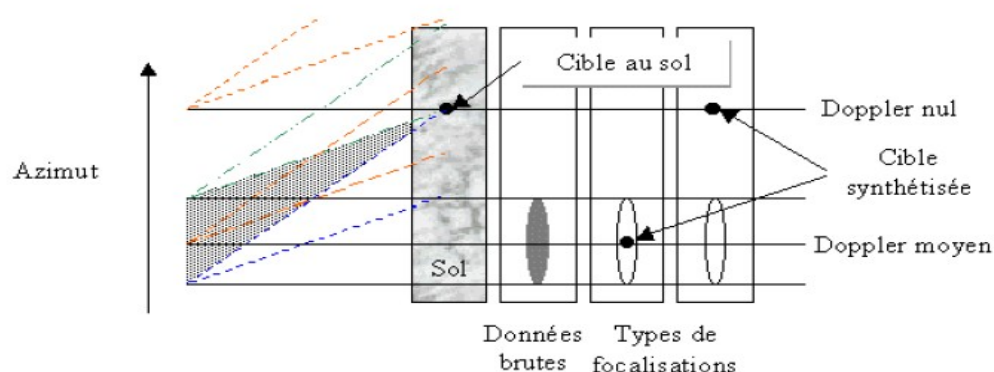
En revanche en azimuth, si l'antenne est dépointée, il peut y avoir distorsion. L'image n'est plus orthogonale, les colonnes pour une distance ne seront plus calées les unes par rapport aux autres.

La figure -III.8- montre que des points qui au sol, ne sont pas alignés (dans la direction perpendiculaire à la trajectoire), sont assignés à la même position azimuthale dans l'image radar. Il faut décaler les colonnes en fonction de la distance pour corriger cette distorsion.

En général, cette correction est effectuée au moment de la compression en azimuth. En effet, comme l'histoire d'une cible en terme d'effet Doppler est connue, il suffit de focaliser la cible à la position azimuthale correspondant à un effet Doppler nul. A cette position, La direction porteur-cible est perpendiculaire à la trajectoire et les coordonnées azimuthales sont donc identiques. L'image focalisée sera donc orthogonale.

Ce traitement est schématisé sur la figure -III.9-. La cible n'est plus focalisée au milieu de son étalement en azimuth comme il serait tentant de le faire (traitement dit " à Doppler moyen ") mais à la position azimuthale qu'occupe le porteur au moment où l'effet Doppler est nul (traitement dit " à Doppler nul "). Nous pouvons observer que la cible ne se trouve pas nécessairement dans le lobe d'antenne à l'instant du Doppler zéro.

III-



Figure

9 :

**Focalisations à Doppler moyen et à Doppler nul**

### III.5- CHAINE DE TRAITEMENT : [5]

### **III.5.1- Etapes du traitement de synthèse :**

Les étapes décrites précédemment sont résumées sur la figure -III.10-. Une image Radarsat de Montréal prise le 19 avril 1998 illustre le procédé de synthèse d'une image de SAR à partir de données brutes. Nous pouvons constater que :

- Une image brute ne permet d'observer aucune structure, quelle que soit sa taille. A peine est-il possible de déceler la trace du fleuve St Laurent. Plutôt que brute, l'image semble bruitée.
- La place du fleuve en distance a changé sur l'image synthétisée : dû au choix du point de focalisation.
- Sans correction des migrations, pour Radarsat, l'image générée est de piètre qualité.
- Le speckle gêne l'interprétation de l'image.

### **III.5.2- Traitement temporel :**

La figure -III.10-, décrit un traitement que l'on pourrait qualifier de temporel ou géométrique. En effet, l'image générée après chaque traitement est directement stockée en coordonnées distance -azimut. Ce traitement temporel est nettement avantageux d'un point de vue qualité image.

En effet, si la trajectoire du porteur par rapport au sol est connue, les variations de distance d'un point au sol sont exactement quantifiables. Ainsi, s'il ne se déplace pas en ligne droite (vents, dérives de pilotage pour un système aéroporté), l'effet Doppler n'est pas celui souhaité mais reste néanmoins prévisible.

Également nous pouvons nous affranchir des problèmes de corrections géométriques : les migrations, changements de référentiels, projections ils sont directement calculées au cours de la compression. En outre, le traitement géométrique ne présente pas de difficulté de mise en équation insoluble.

**Désavantage:**

En revanche, les techniques numériques à mettre en œuvre sont onéreuses en termes de temps de calcul. Deux corrélations sont à appliquer - opérations de complexité en  $n^2$  et de nombreux calculs géométriques sont indispensables dans la boucle ultime. La contrainte majeure est donc le produit temps - puissance de calcul disponible ce qui conduit à faire des concessions entre qualité de synthèse et temps total de traitement. Cependant, l'envolée permanente des performances des calculateurs tend à lever cet obstacle.

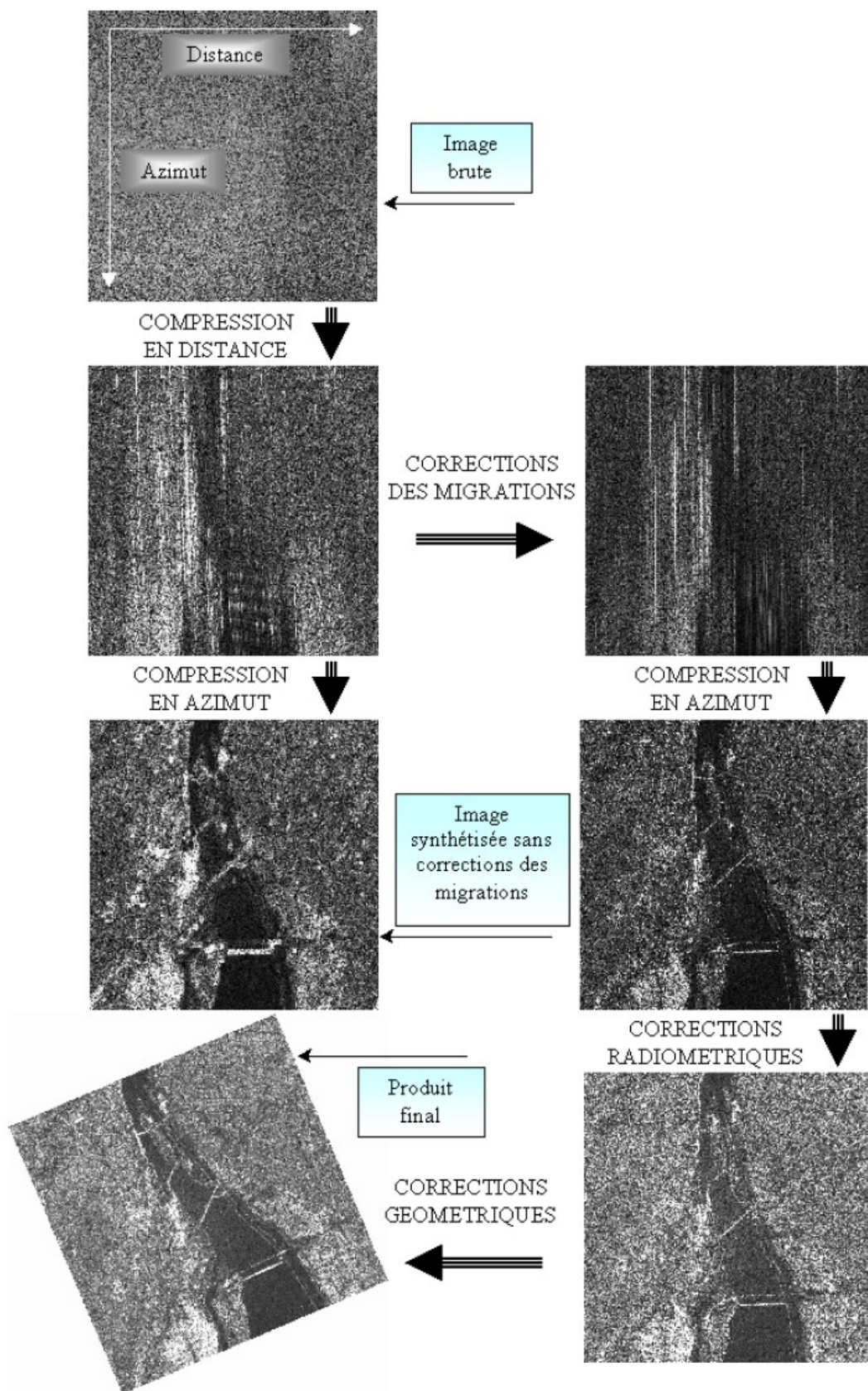


**Figure III-10: Chaîne de traitement temporel de la synthèse radar**

### III.6- TRAITEMENTS SPECIFIQUES (Traitements fréquentiels) :

#### Rappels sur les transformées de fourrier

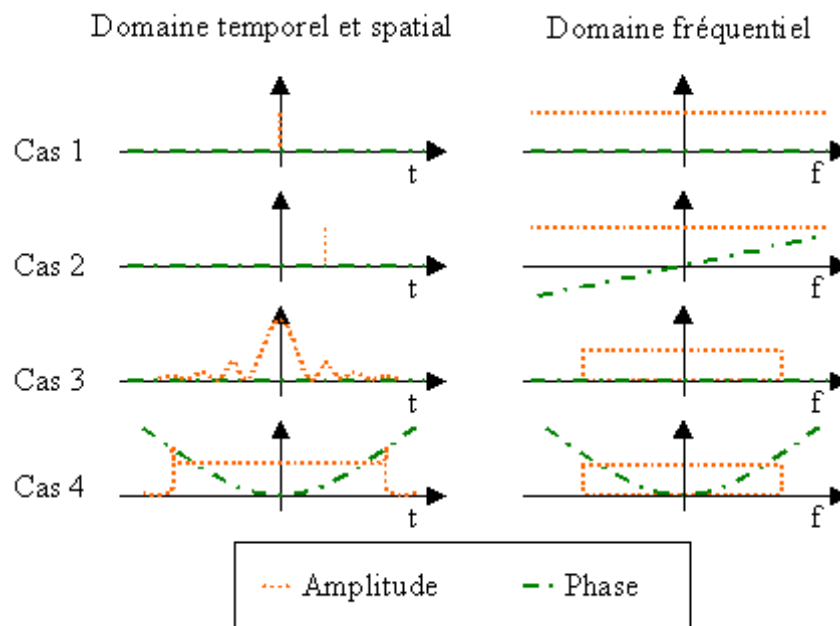


**Figure III-11 : Transformées de Fourier de quelques signaux**

La figure -III.11- rappelle les transformées de Fourier de quelques signaux fréquemment rencontrés en radar. Ainsi,

- Le Dirac a un spectre en amplitude constante et de largeur infinie et une phase nulle.
- Une rampe de phase en fréquence est équivalente à un décalage dans l'espace égal à la pente : Une rampe de phase de  $2\pi Nf$  décale le Dirac de  $N$  en temporel.
- Un créneau est associé dans l'espace homologue à un sinus cardinal. Sa largeur a **-3dB** est inversement proportionnelle à la largeur du créneau.
- Une parabole de phase provoque un étalement du signal sous forme de créneau. La largeur et la forme du créneau sont d'autant plus marquées que la pente de la parabole est forte. En revanche, l'amplitude diminuera avec la largeur.

Nous pouvons noter qu'un signal d'amplitude constante, mais avec une phase parabolique est de toute évidence un signal modulé en fréquence.

### **III.6.1- Traitements fréquentiels :**

#### **III.6.1.a- Compressions :**

Comme le signal reçu est modulé en fréquence, en distance comme en azimuth. alors La méthode temporelle pour comprimer ces impulsions consiste à corrélérer le signal reçu avec le chirp retardé. Cependant, l'intercorrélation de deux signaux est égale à une convolution entre le premier signal et le conjugué du symétrique du second signal. Or, la convolution est une opération aisément transposable dans le domaine de Fourier, où elle prend la forme d'un simple produit. En outre, le chirp centré est symétrique dans le temps (une fois que la porteuse est soustraite). La corrélation revient donc à calculer dans l'espace de Fourier le produit de la transformée du signal reçu et de la transformée du conjugué du chirp. Or, un calcul de **FFT** est une méthode numérique parfaitement maîtrisée et de complexité en  **$n \ln(n)$** . Un traitement fréquentiel sera donc particulièrement efficace.

Reprenons le raisonnement à l'aide de la figure-III.10-. Nous savons que le signal d'une cible ponctuelle est un chirp. Nous sommes donc dans le cas 4 de la figure-III.10- Si nous supprimons la phase de sa transformée de Fourier, nous nous retrouverons dans le cas 3, où le signal est un sinus cardinal dans le domaine temporel. Or la parabole de phase est connue, il suffit donc de la soustraire pour l'annuler. Cela revient donc dans le domaine de Fourier, à une multiplication par la transformée du chirp avec une phase opposée (le conjugué).

#### **III.6.1.b- Taux de compression :**

Dans les calculs, la transformée de Fourier du chirp est généralement assimilé à un chirp. Son amplitude est normalisée à 1, et sa phase varie donc paraboliquement.

Nous définissons alors les fréquences réduites  $f_{ra}$  et  $f_{rd}$  selon que le traitement s'effectue en azimuth ou en distance :

$$f_{ra} = \frac{f}{PRF} \quad \text{et} \quad f_{rd} = \frac{f}{F_e}$$

La transformée du signal doit donc être multipliée par une fonction de la forme suivante, équation-III.15-, et appelée réplique (sous-entendu réplique ou conjuguée de la transformée du chirp).

$$\exp(-j\pi N f_r^2) \quad (III.15)$$

$N$  est appelé taux de compression car il indique l'étalement d'une cible en nombre de pixels. Il est également qualifié de longueur de corrélation. En effet, localement, la pente est de  $-N f_r$  or l'intervalle de variation de  $f_r$  est de 1.  $N$  représente donc bien le décalage maximal d'une contribution.

Ce taux peut être défini en fonction des paramètres de l'acquisition :

- En azimuth, l'excursion en distance des contributions est :

$$x = \frac{\lambda R_0}{2v} \Delta f, \text{ ce qui donne en pixels : } \frac{x PRF}{v} = \frac{x R_0 PRF \Delta f}{2v^2}$$

D'après Shannon, l'excursion maximale en fréquence qui peut être mesurée est PRF, d'où le taux de compression  $N_a$  :

$$N_a = \frac{\lambda R_0 PRF^2}{2v^2} \quad (III.16)$$

- En distance, le taux de compression  $N_d$  est fonction de la durée  $T$  du chirp émis :

$$N_d = T F_e \quad (III.17)$$

### III.6.1.c- Corrections des migrations :

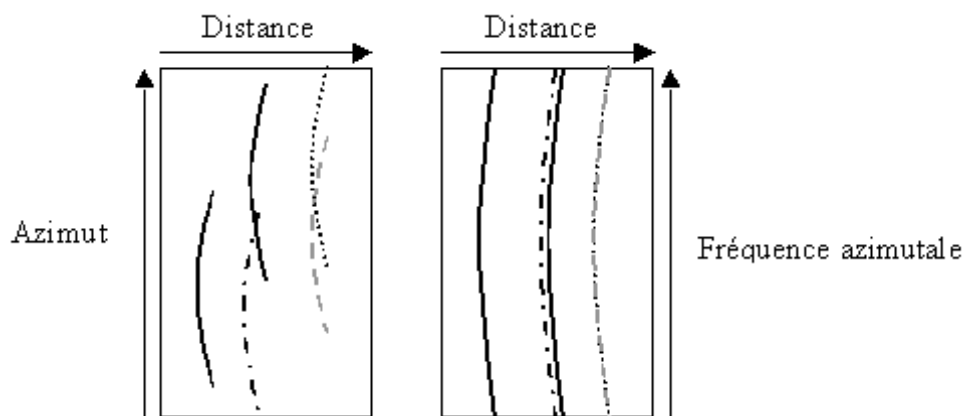


**Figure III-12 : Migration en azimuth et en fréquentiel-azimut**

La figure -III.11- met en évidence qu'une rampe de phase en fréquentiel permet de décaler un point en temporel. Ce phénomène est fort commode pour corriger les migrations. Cette opération effectuée après la compression en distance et avant la compression en azimuth (ou pendant une de ces deux phases) exige un lourd calcul d'interpolation lorsqu'elle est effectuée en temporel. Tandis que l'application d'une rampe de phase en fréquentiel-distance permet aisément de recaler une ligne.

De plus, sur une même ligne, se superposent les contributions de différentes cibles, dont la migration est différente. Le travail de correction des migrations ne se limite donc pas à un simple décalage de ligne, il faut extraire puis déplacer chaque contribution en fonction de sa position dans l'étalement.

En revanche, le travail est bien plus simple en fréquentiel-azimut, figure -III.12- . En effet, le décalage en distance est directement fonction du décalage Doppler du signal. Les migrations peuvent donc être corrigées des traitements fréquentiels en azimuth comme en distance. Il

suffit alors d'appliquer une rampe de phase en fonction de la fréquence en distance, dont la pente varie paraboliquement en fonction de la fréquence en azimuth.

Nous définissons le facteur de migration :

$$F_{\text{mig}} = \frac{\lambda F_e}{2c} \quad (\text{III.18})$$

La fonction correctrice est alors la suivante :

$$\exp(-j2\pi(F_{\text{mig}} N_a f_{ra}^2) f_{rd}) \quad (\text{III.19})$$

### III.6.2- Chaîne de traitement fréquentiel:

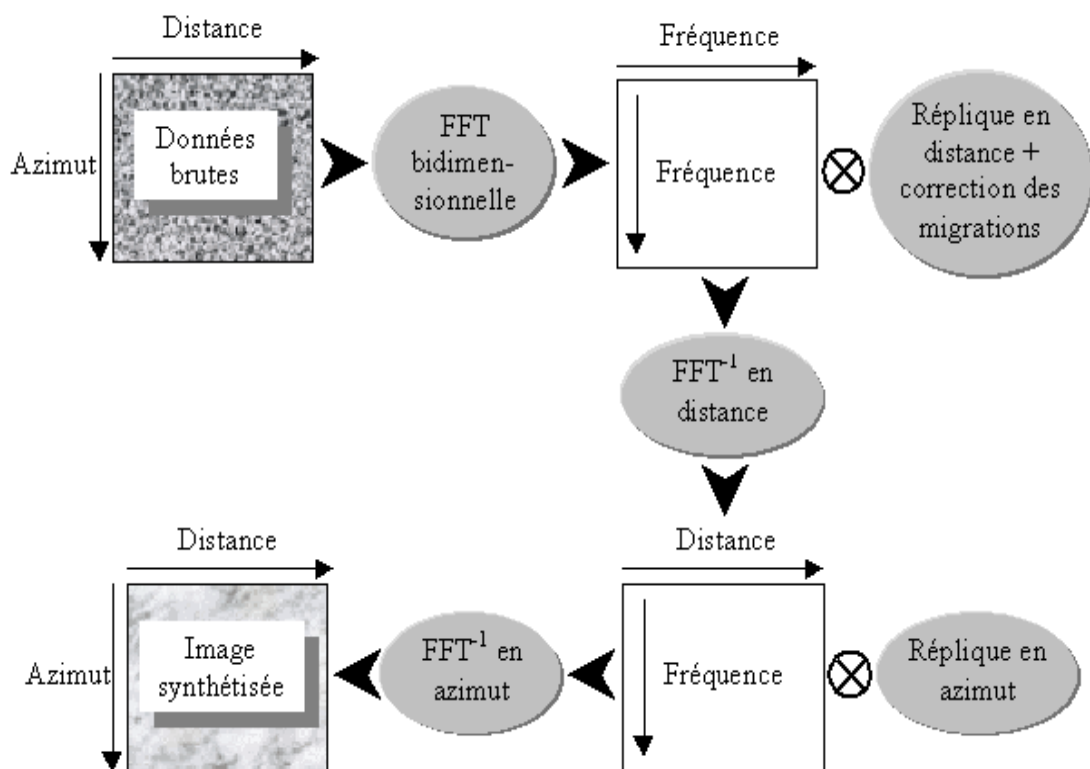


**Figure -13 : Chain Traitements fréquentiels**

L'ordonnancement des étapes de la chaîne de traitement est rigoureusement identique à celui étudié précédemment, avec toutefois des transformations de Fourier intercalées. Nous

pouvons observer que la réplique en azimuth pourrait être appliquée dans l'espace bidimensionnel de Fourier, toutefois le taux de compression azimuthal varie avec la distance, il est donc indispensable de retourner en distance pour effectuer les corrections requises.

### III.7- EXEMPLE D'APPLICATION (REFLEXION PONCTUEL) : [13]

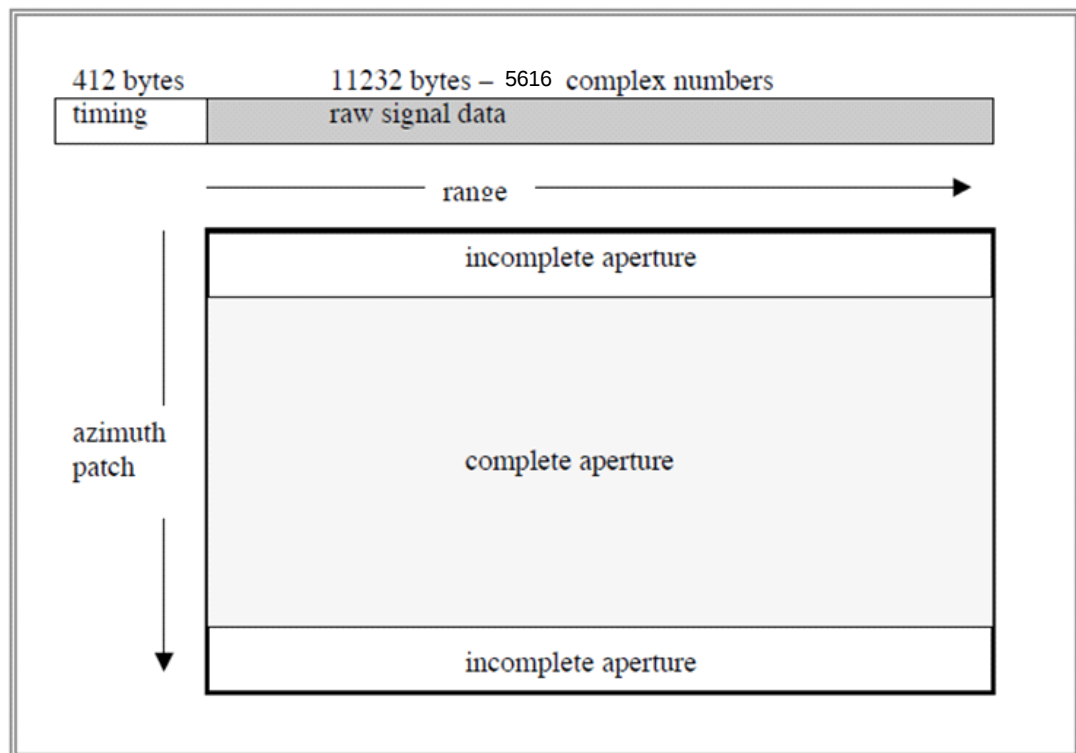
L'objectif du traitement SAR est de focaliser les échos dispersés de la scène imagée, constituant les données brutes, afin de former une image à haute résolution en utilisant la technique de compression d'impulsions en distance et en azimuth. Le principe de cette technique est exposé ici.

#### Numérisation des données brutes :

La numérisation des données à 8 bits par Pixel semblerait plus commode. Les ingénieurs se réfèrent aux composants réels et imaginaires du signal ( in-phase de (i) et de quadrature (q)).

Les données brutes de signal contiennent des lignes de (11644 octets) qui représentent un écho simple de radar. Les 412 premiers octets sont la synchronisation tandis que les 11232 octets restants contiennent les 5616 nombres complexes de données brutes de signal.

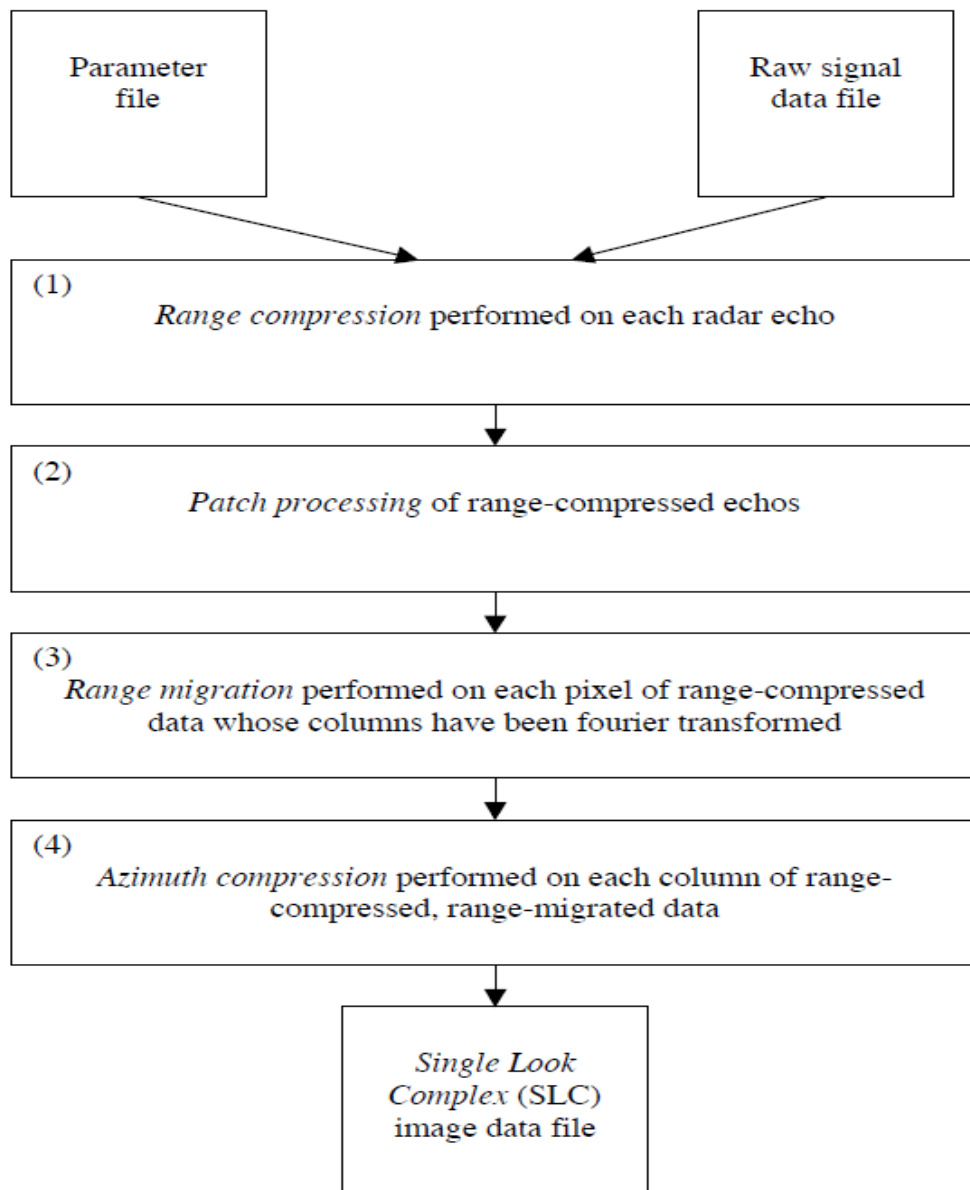
#### Données brutes De Signal



### **Traitement numérique de SAR :**

Le traitement numérique de SAR est un programme machine qui convertit les données brutes de signal en image complexe (SLC). Une vue d'ensemble de l'algorithme est fournie dans le diagramme au-dessous. Avec cette information on peut écrire un processeur de base de SAR en utilisant juste quelques lignes de code **MATLAB**. Un programme d'exemple est fourni dans l'annexe.

### Digital SAR Processing Overview



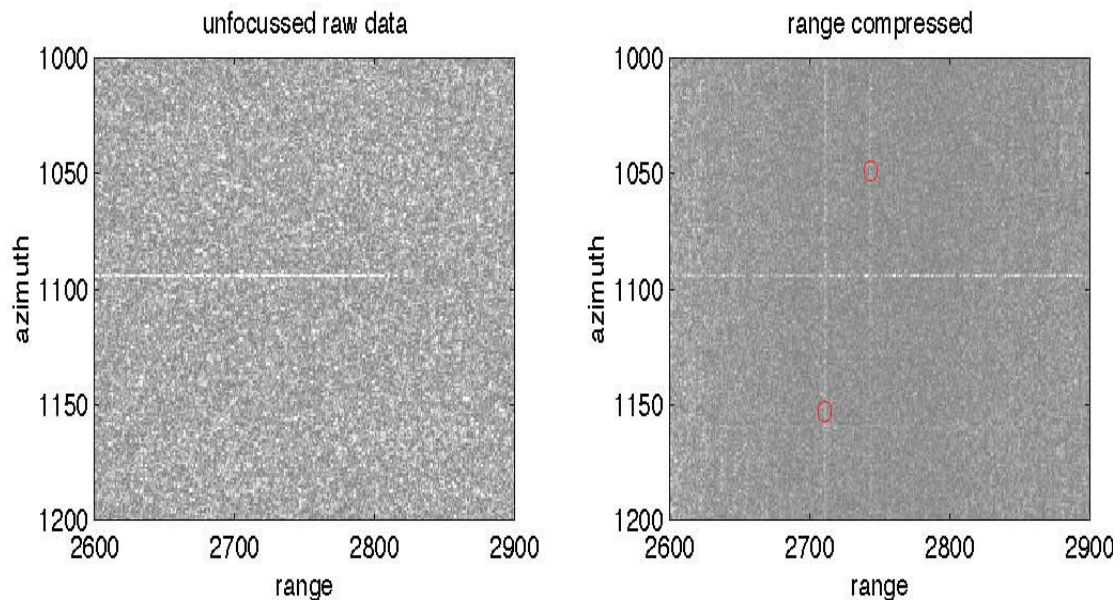
### Compression en distance :

En peut avoir une image comprimée en distance en utilisant MATLAB et les paramètres de radar (voir annexe).

La figure ci-dessous est une petite empreinte rapportée des données ERS-2 pour un secteur autour de Pinyon Flat (Californie). Ce secteur contient deux réflecteurs de radar espacés

environ 600 m de distant. L'amplitude des données brutes de signal apparaît comme bruit avec une ligne horizontale due à l'absence des données.

La compression en distance de données nous donne deux lignes verticales dues à la réflectivité élevée des réflecteurs (cercles rouges) avec la présence d'un étalement en azimuth des données due au processus d'ouverture synthétique.

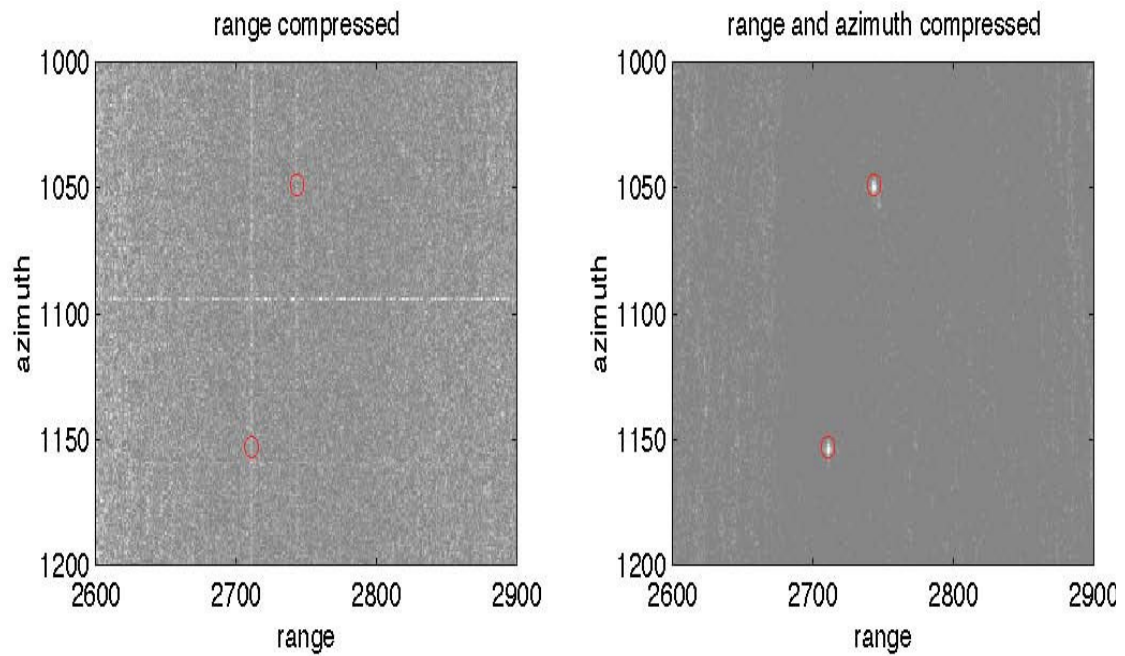


Le réflecteur

### Compression en azimuth :

En utilisant MATLAB (annexe) et la compression d'azimut, on peut focaliser l'image dans la direction azimutale, soit la figure au-dessous de la même empreinte précédente du ERS-2. Les données comprimées en distance (image gauche) montrent deux lignes verticales. L'image

entièrement focalisée (droite) montre deux points de hautes réflectivités associées aux deux réflecteurs radars.



### III.8- LES ETAPES D'ANALYSE D'IMAGES SAR

#### INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons comment une scène réelle peut être représentée sous forme numérique, afin d'être manipulée et interprétée par un ordinateur. Nous présentons également les principales étapes de traitement de l'image numérique. Ce traitement se subdivise en quatre étapes: filtrage, détection de contours, segmentation et classification. Le processus d'interprétation d'une image commence généralement par le filtrage afin d'éliminer le bruit qui peut se produire lors de la phase d'acquisition ou de numérisation de l'image. Il s'agit, ensuite, de segmenter l'image en différentes régions. Ces régions peuvent être aussi déterminées en détectant les contours qui constituent les frontières entre les régions de l'image. La dernière phase consiste à exploiter l'information donnée par la segmentation pour classifier ou reconnaître les objets de l'image.

### III.8.1- Le filtrage : [14],[16]

Le filtrage d'une image consiste à éliminer le bruit (*speckle*) pour faciliter le traitement et l'interprétation de cette image. Le bruit se produit généralement lors de la phase d'acquisition et de numérisation de l'image.

La cellule élémentaire de l'image (pixel) n'est pas constituée par un seul diffuseur, mais correspond plus souvent à la présence de plusieurs micro-cibles. Les impulsions émises sont de nature cohérentes, les réponses des différentes micro-cibles s'interfèrent de façon constructive ou destructive (dans le cas où l'interférence serait constructive on obtient une tache brillante, sombre dans le cas contraire). Lorsque la répartition spatiale de ces interférences est désordonnée (cas des surfaces naturelles), on considère ces interférences comme un bruit multiplicatif appelé *speckle*. Ce qui se traduit par une image **granulée** qui dégrade fortement la résolution radiométrique apparente.

L'utilisation des images radar nécessite que le *speckle* soit réduit autant que possible, sans que les caractéristiques spatiales de l'image n'en soient trop affectées.

Cependant le caractère multiplicatif de *speckle*, ne permet pas une simple adaptation des filtres utilisés en traitement de signaux entachés de bruit additif, fait de traitement d'image RADAR un problème largement ouvert.

### III.8.1.a- Présentation du filtrage de *speckle* :

Une opération de filtrage idéale, éliminerait le *speckle* des zones homogènes, préserverait la texture et les structures spatiales contenues dans l'image, restaurerait la réponse d'objets quasi déterministes sur lesquels le *speckle* n'est pas pleinement développé.

En pratique, il n'existe pas de filtres idéals répondant à toutes ces exigences, mais certains se comportent mieux que d'autres en répondant correctement à un plus grand nombre d'entre elle à la fois.

Une opération de filtrage consiste à estimer la **réflectivité  $R$**  en fonction de **l'intensité  $I$**  de pixel traité, et des paramètres estimés localement autour du pixel en question. Il est possible d'appliquer différents critères statistiques permettant l'estimation de  **$R$** .

Le critère le plus employé est le critère d'Erreur Quadratique Moyenne Minimale (EQMM), consiste à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre la valeur estimée  $\bar{R}$  et la valeur réelle  **$R$** . d'autres critères sont aussi appliqués, tel que :

- L'estimation Maximum de vraisemblance (**ML** : Maximum likelihood), qui introduit une connaissance a priori du bruit.
- L'estimation Maximum a Posteriori (**MAP**).

### III.8.1.b- Classification des filtres de *speckle* :

Le classement est schématisé à la figure-III.14-

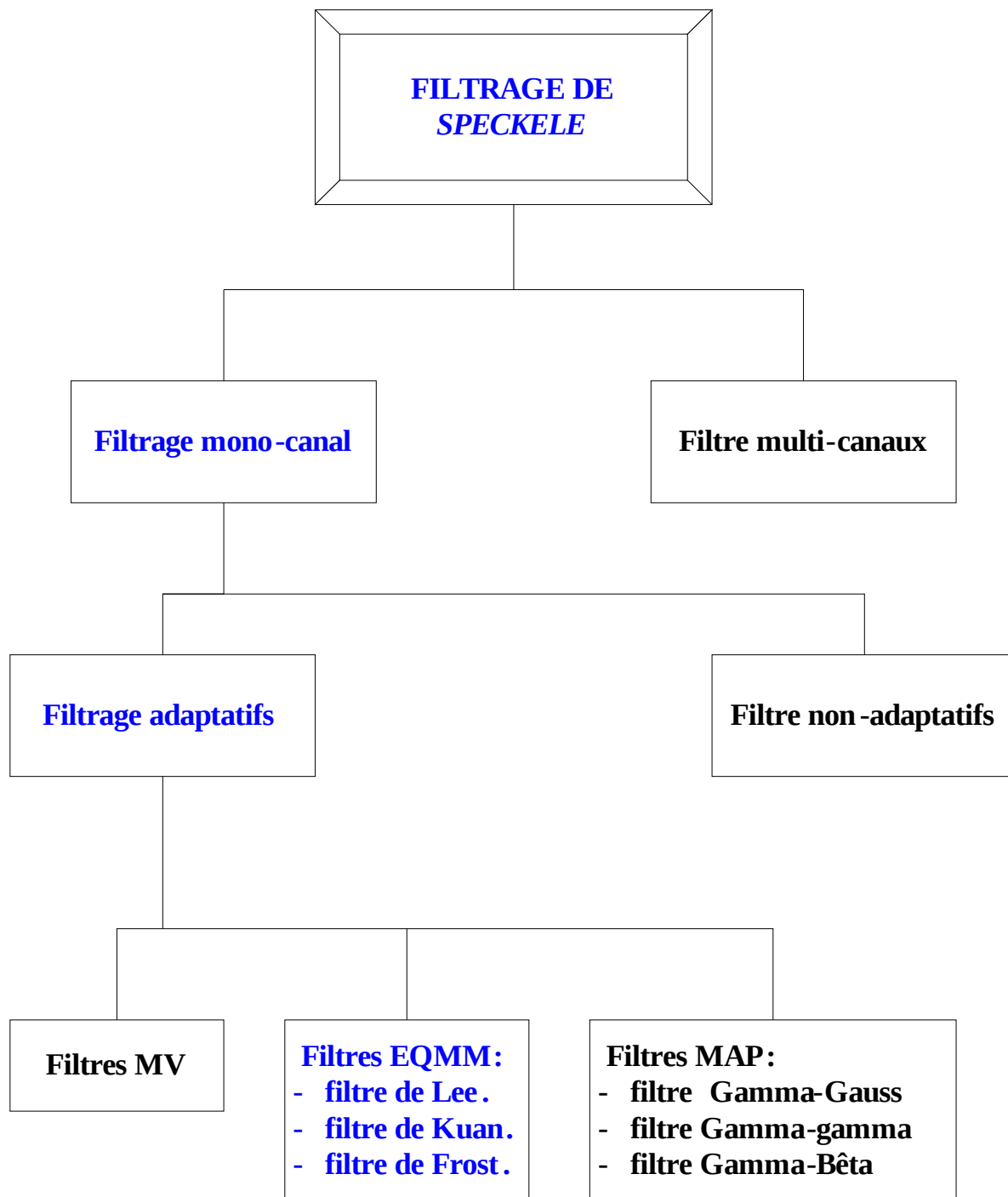
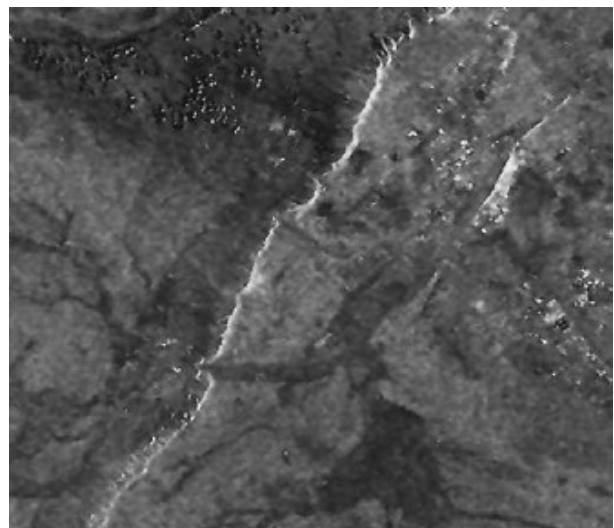
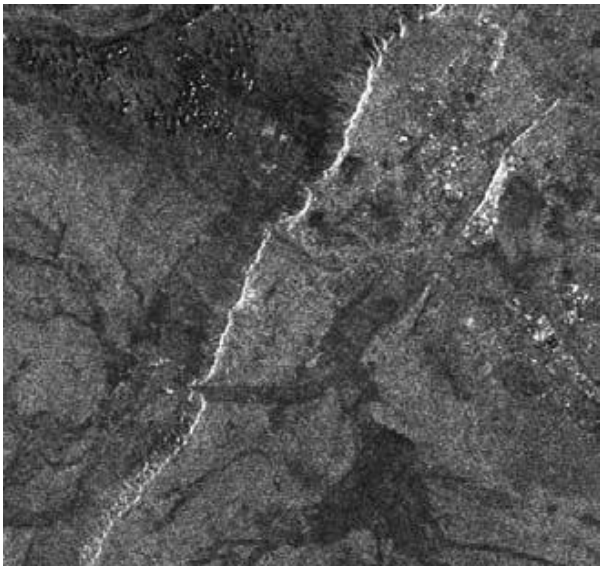
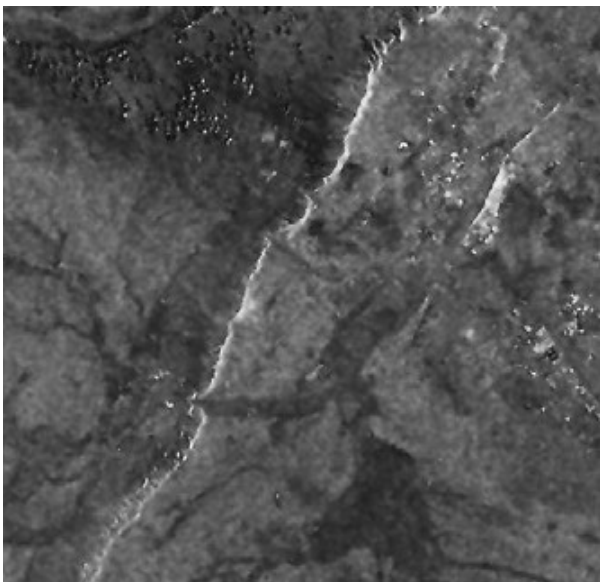


**Figure III-14 : v**

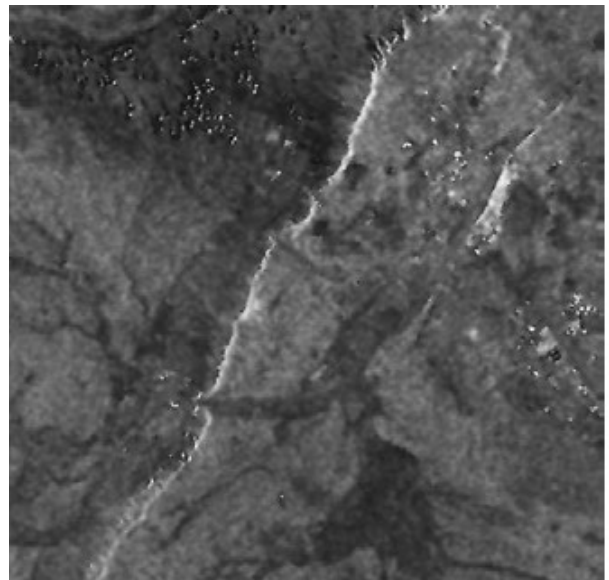




a. Image originale (LAGHOUAT)



c. Filtre de Kuan



d. Filtre de Frost

**Figure III.15: images filtrées**

### III.8.2- Détection de contours : [14]

Un contour peut être défini comme une frontière entre deux régions de niveaux de gris différents (figure). En effet, un contour présente en générale une transition de niveaux de gris.

Ainsi, les contours peuvent être détectés par l'examen des variations locales du niveau de gris au voisinage de chaque point de l'image. Il s'agit, en effet, d'utiliser des opérateurs locaux qui sont sensibles aux variations de la fonction image.

Les points de contours d'une image sont les points qui présentent une transition de niveau de gris. Le gradient est un opérateur sensible à cette transition.

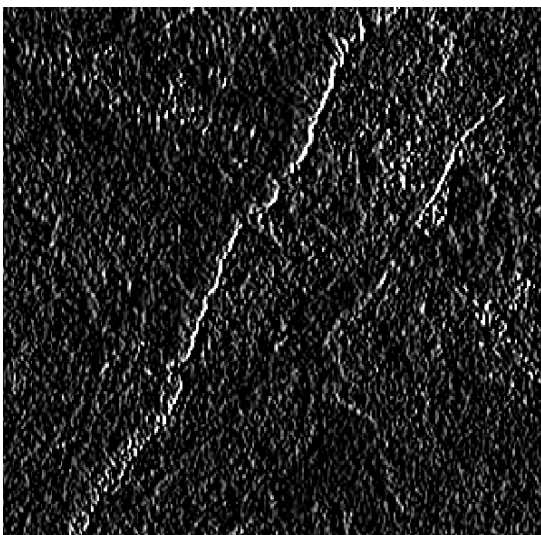
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1)

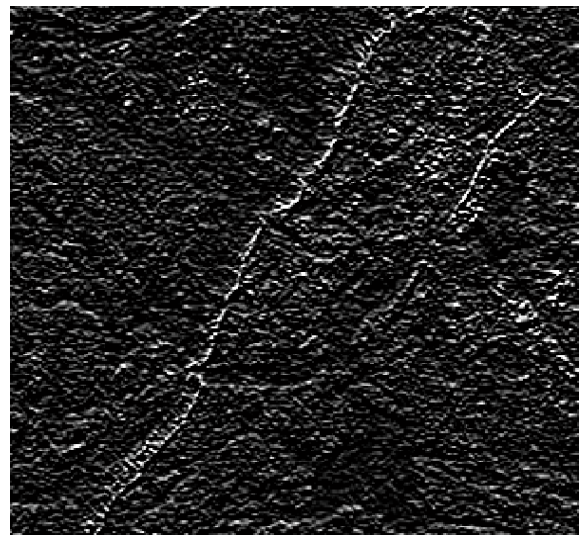
$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)

Masques de Sobel



(1)



(2)

**Figure III.16 : L'image du gradient calculé sur l'image original**

### III.8.3- La segmentation : [14]

La segmentation est l'opération qui consiste à subdiviser l'image en régions qui correspondent à des objets de la scène réelle. En effet, cette subdivision permet de passer d'une description de l'image, constituée de la liste des valeurs de niveaux de gris à une description où chaque région mise en évidence peut être interprétée comme une composante de la scène analysée. La

segmentation d'images suppose connu un ensemble d'attributs des points de l'image (position, niveau de gris), et exploite l'information spatiale (voisinage, connexité). La segmentation est à la base de toute méthode de reconnaissance des objets de la scène.

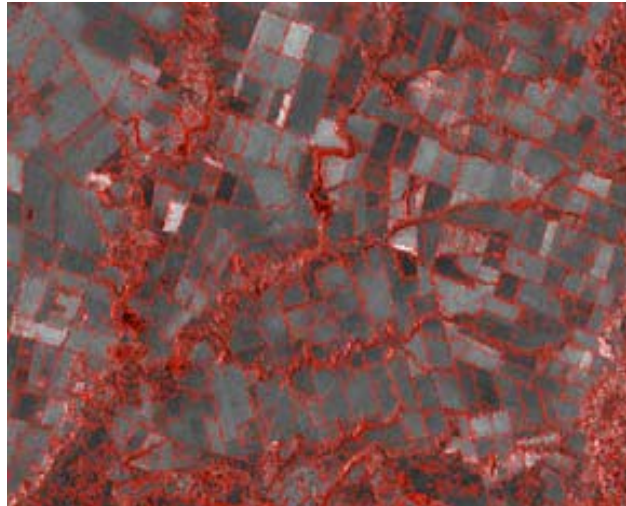


**Figure III.17: Image segmentée d'ERS-2 SAR**

#### **III.8.4- La classification : [14], [11]**

Les techniques de classification sont des outils relativement bien maîtrisés dans le domaine radar moyenne résolution. La classification d'images a pour objectif d'affecter à chaque pixel de l'image une étiquette déterminant ce qu'il représente dans une scène (une zone de végétation, une zone d'eau, etc.). Les techniques de classification de scènes, contrairement aux outils de détection de structures, sont construites sur une démarche régionale de la scène à traiter. Elles permettent d'obtenir une vision globale de la composition d'une image quelconque.

Les techniques de classification sont nombreuses et souvent adaptées à une application et à un type de données (donnée en amplitude, données multi-temporelles, donnée multifréquentielles, etc).

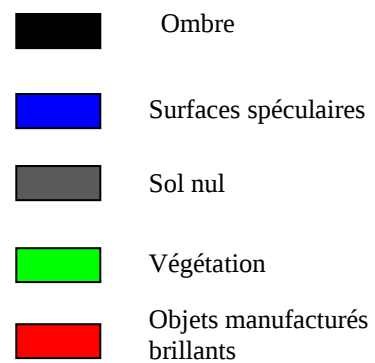
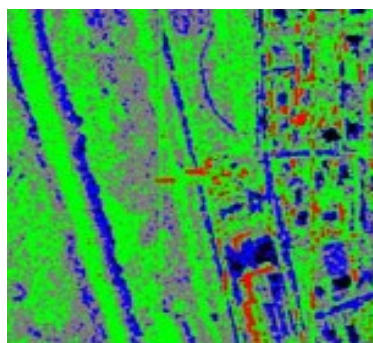


**Figure III.18: Résultat de la classification**

# CHAPITRE IV

## Cartographie

## **IV.1-INTRODUCTION :**

Plusieurs études (Desrochers *et al.* 1997 ; Ford, 1998 ; Lewis and Henderson, 1998 ; Singhroy and St-Jean, 1999 ; ...) ont montré le potentiel de l'imagerie radar pour la cartographie.

Utiliser les images radar SAR pour réactualiser des fonds cartographiques demande que ces dernières soient correctement géoréférencées, c'est à dire que l'on connaisse les coordonnées géographiques de chaque pixel de l'image (Latitude, Longitude, Hauteur dans un référentiel connu).

La méthode que nous développerons dans ce paragraphe demande en entrée des données orbitographiques précises, elle ne s'applique que sur des zones relativement plates (terrain non accidenté), mais ne nécessite pas de points d'appui.

## **IV.2- LE GÉORÉFÉRENCEMENT :**

### **IV.2.1-Définition :**

Géocodage, Géoreference, calibrage géométrique, et Ortho-rectification sont des synonymes. Tous ces termes signifient la conversion des images SAR de la projection oblique en distance (slant range) qu'est la géométrie originale du SAR dans le système de référence cartographique local (par exemple UTM-32, Gauss-Krueger, Mercator oblique, etc.).

### **IV.2.2-Principes de Géoréférencement :**

Afin de pouvoir déterminer la position d'un pixel d'une image radar, nous devons disposer des informations suivantes :

- La hauteur du géoïde par rapport à un référentiel connu sur le site imagé.
- L'orbitographie du satellite (dans un référentiel connu).
- Les paramètres de transformation, des différents systèmes de référence utilisés dans les étapes précédentes.
- Les paramètres d'acquisition et la géométrie interne de l'image.

#### IV.2.2.1-Les systèmes de références :

**Coordonnées cartésiennes:** coordonnées dans un système géodésique, repère géocentrique orthonormé  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  de coordonnées  $(X, Y, Z)$  où  $O$  est proche du centre des masses de la terre,  $\vec{i}, \vec{j}$  dans le plan équatorial et  $\vec{k}$  dans la direction du nord géographique.

**Coordonnées géographiques:** coordonnées dans un système géodésique, latitude  $(\varphi)$ , longitude  $(\lambda)$  et hauteur  $(H)$ , auquel on associe un ellipsoïde centré en  $O$ . L'ellipsoïde est défini par son demi grand axe et demi petit axe ( $a$  et  $b$ ).

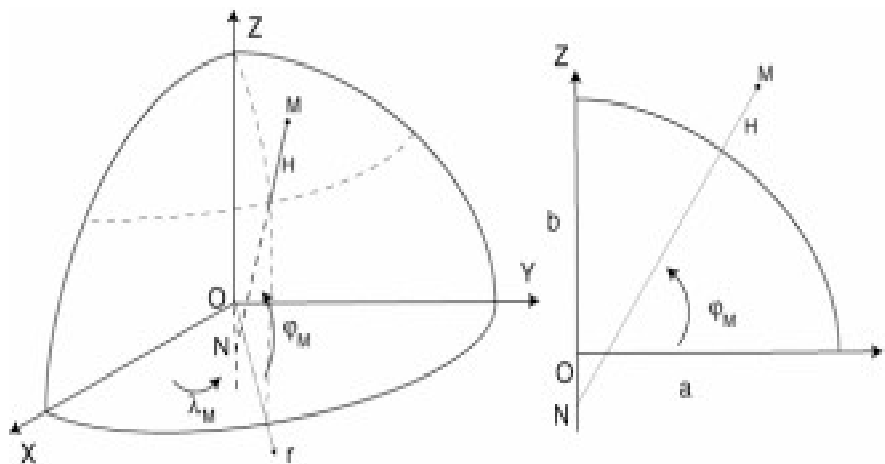


**Figure IV.1: Coordonnées géographiques**

**Coordonnées cartographiques :** coordonnées correspondant à une projection plane de l'ellipsoïde.

#### **Le géoïde :**

Le géoïde est une surface équipotentielle de référence du champ de gravité terrestre qui correspond environ au niveau moyen des mers. C'est sur un ellipsoïde concentrique à l'ellipsoïde WGS84 et coïncidant, localement, avec le géoïde de géoréférencement des images.

L'équation de l'ellipsoïde de référence utilisée localement peut s'écrire :

$$\frac{x^2+y^2}{(a+H)^2} + \frac{z^2}{(b+H)^2} = 1 \quad (\text{IV-1})$$

Où  $a$  et  $b$  correspondent respectivement au demi-grand et demi-petit axe de l'ellipsoïde GRS80 et  $H$  est l'altitude locale du géoïde par rapport à cet ellipsoïde.

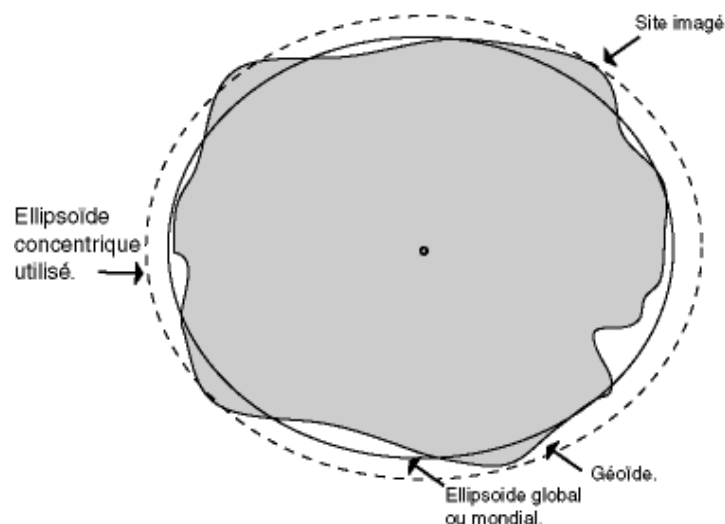


Figure IV.2: Le géoïde et les différentes surfaces utilisées.

#### IV.2.2.2-Orbitographie des satellites :

Les produits orbitographiques ERS sont constitués d'une succession de positions du satellite espacées dans le temps de 30 ou 60 secondes (jour, heure, latitude, longitude, hauteur) selon le fournisseur de données.

Le type et la qualité des produits orbitographiques dépendent de leur centre de traitement d'origine et du délai entre le passage du satellite et la fourniture du produit. Le tableau V.1 indique la précision des différents produits telle que fournie par les centres de traitement.

| Type d'orbite. | Disponibilité                                | Précision en U (m).           | Précision en V (m). | Précision en W (m). |
|----------------|----------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| prédite        | Quelques jours avant le passage du satellite | Plusieurs centaines de mètres | Non communiqué      | 400                 |
| opérationnelle | Quques jours après                           | 0.5                           | 4.0                 | 2.0                 |
| préliminaire   | Une semaine après                            | ~0.2                          | ~0.2                | ~0.2                |
| précise        | Un mois après                                | ~0.1                          | ~0.1                | ~0.1                |

**Tableau IV.1** : Précision des différents produits orbitographiques, (U, V et W sont respectivement les composantes radiales, le long de la trajectoire et perpendiculaire au plan orbital (source : centres de traitement ESA, D-PAF, DUT)).

#### IV.2.2.3-Paramètres d'acquisition et géométrie des images :

Le géoréférencement demande de connaître l'heure d'acquisition de chaque ligne de l'image ainsi que la distance entre le satellite et le point imagé à terre. Ces données sont fournies dans un fichier accompagnant chaque image.

Pour les scènes ERS de type SLC (single look complex) Le fichier de paramètres internes du satellite nous fournit :

- L'heure d'acquisition de la première et de la dernière ligne de la scène.
- La résolution en azimuth (sens de déplacement du satellite).
- Le temps aller-retour de l'impulsion radar pour la première et la dernière colonne (portée proximale et portée distale).
- La fréquence d'échantillonnage en distance.

Chaque point de l'image peut être référencé directement par rapport au satellite.

#### IV.2.2-Méthode de référencement géographique :

Nous avons discuté dans les paragraphes précédents des différentes questions qui se posent en amont du géoréférencement proprement dit (orbitographie des satellites et imagerie en distance). Cette partie plus technique discutera de l'algorithme choisi pour le programme de géoréférencement.

Nous souhaitons obtenir les coordonnées cartésiennes (x, y, z) d'un point M imagé à un instant donné. En considérant que l'image a été prétraitée par un centre de traitement pour un doppler zéro, il est possible d'écrire :

$$(\overrightarrow{MS}(t)) \cdot \vec{V}(t) = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Où **S** est la position et **V** la vitesse du satellite à l'instant t et M la position du point à terre. Connaissant la durée  $\Delta t$  aller-retour de l'onde radar on peut écrire :

$$\|\overrightarrow{MS}(t)\| = D = \frac{\Delta t * C}{2} \quad (\text{IV-3})$$

**C** est la célérité de l'onde dans l'atmosphère (voisine de la vitesse de la lumière).

Le point cherché est solution des équations IV-2 et IV.4 :

$$\frac{x^2+y^2}{(a+H)^2} + \frac{z^2}{(b+H)^2} = \frac{(x-x_s)^2+(y-y_s)^2+(z-z_s)^2}{D^2} \quad (\text{IV-4})$$

L'équation IV.4 peut ensuite être simplifiée dans un espace à deux dimensions dans le plan normal au vecteur vitesse du satellite.

Les coordonnées géographiques de chaque pixel de l'image peuvent être directement calculées par cette méthode (avec quelque développement). Le temps de traitement pour chaque scène ( $\sim 10^6$  positions à calculer) étant très long, nous ne calculons en fait qu'une grille de points.

Cette dernière phase nous permet d'obtenir un modèle direct de déformation (grille de points en coordonnées-images vers coordonnées géographiques). La position de chaque point de l'image finale est interpolée dans cette grille de points. L'interpolateur utilisé est de type lagrangien. Le pas de la grille retenu est de 1000 lignes, 1000 colonnes.

### **IV.2.3-Stratégie de contrôle du géoréférencement des images :**

Cette partie traite des écarts planimétriques observés entre les images radar géoréférencées et les données de référence (anciennes cartes existantes). L'étape de validation de l'outil de géoréférencement s'est tout d'abord appuyée sur plusieurs types de mesures effectuées sur le terrain, à savoir :

- Des relevés de points GPS géodésiques acquis au cours de missions terrain.
- Des points issus de cartes topographiques.
- Des trajectographies aériennes GPS.

Cette étape de validation a aussi donné lieu à une méthode de contrôle spatial qui consiste à apparier des points d'une image acquise en mode montant avec ceux d'une image acquise en mode descendant et à vérifier la coïncidence de leurs coordonnées après géoréférencement des deux images (figure IV.4)

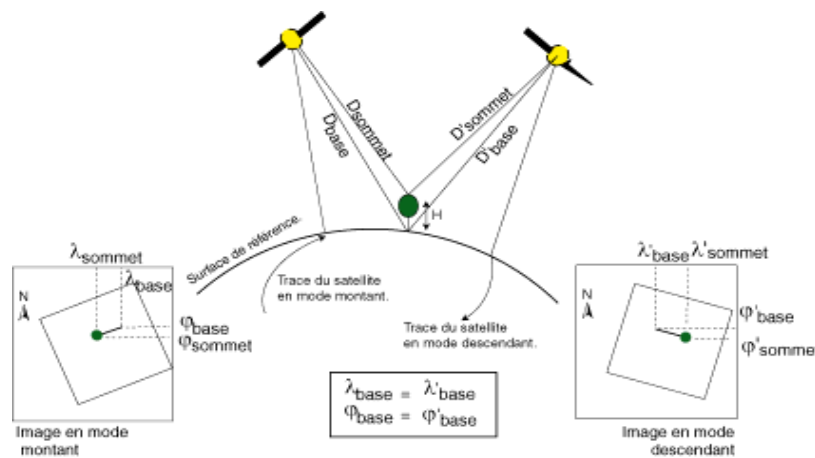


**Figure IV.4 : Perception d'un point d'altitude zéro sur images en mode montant et descendant**

La figure IV-5 résume le géoréférencement des images SAR :

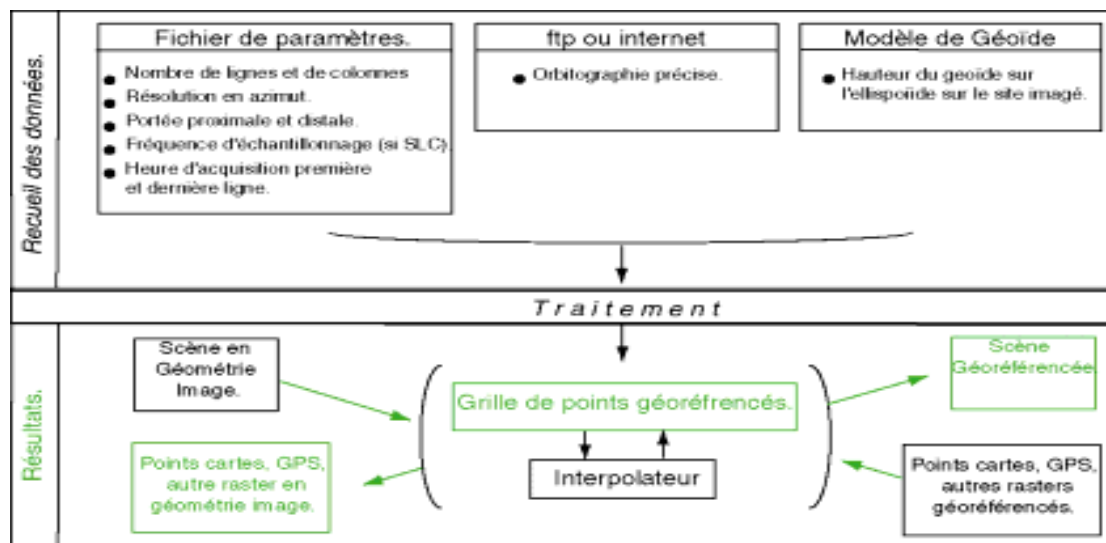


**Figure IV.5 : Résumé des traitements géométriques**

## IV.3-APPLICATIONS DU GEOREFERENCEMENT POUR LA CARTOGRAPHIE :

### IV.3.1. Recalage dans un système mondial :

Sur les régions où le système géodésique local est mal connu par rapport à WGS84, le géoréférencement de scènes spatiales sans mesures au sol de points d'appui est un atout important. Sans pour autant pouvoir, de façon évidente, déterminer les paramètres globaux de transformation entre les deux systèmes, il est alors possible de calculer des décalages locaux.

### EXEMPLE :

La carte SHOM N°7568 de 1998 sur la région de Nouakchott a, par exemple, été « calée » à partir de points pris sur l'ancienne carte N°6115. Ce document cartographique est affiché sans contrôle avec des coordonnées supposé appartenir à WGS84 (figure IV.6). Les écarts mesurés entre les images ERS et cette carte font apparaître des valeurs significatives d'environ 200 mètres en longitude traduisant le fait que le référentiel de la carte 6115 n'est pas proche de WGS84.



**Figure IV.6 :** Nota sur les écarts de localisation engendrés par le positionnement par satellites avec la carte SHOM N° 7568

## IV.3.2. Fusion d'orbites montante et descendante :

Le géoréférencement et son contrôle par des méthodes spatiales sont un atout en géométrie des images. Ce type de couplage de scènes radar géoréférencées permet de faire ressortir quantitativement la hauteur de certains objets.

Cette application est intéressante pour les cartographes, surtout pour la navigation marine, car connaître la hauteur de la végétation côtière et d'objets bien visibles de la mer peut aider à la localisation des marins.

#### **IV.4.REALISATION DE CARTES :**

Nous pouvons proposer quelques orientations générales pour l'utilisation des données sous forme d'un organigramme simplifié (figure IV.7) où chaque étape du traitement fait l'objet d'une cartouche spécifique (choix des images, traitement des données, contrôle du géoréférencement, photo-interprétation, contrôle final et documents résultats à fournir aux cartographes).

Le déroulement proposé suppose que la photo-interprétation doit se faire si possible dans la géométrie initiale de l'image avant rééchantillonnage; il prend également en compte le fait que la fourniture des travaux à la section cartographie s'effectue de façon analogique sous forme de calques en polyester. Il est possible d'effectuer les transferts des interprétations des scènes vers les cartographes sous forme numérique.

La figure IV-7 résume le Traitement des images SAR dans une chaîne de production cartographique.

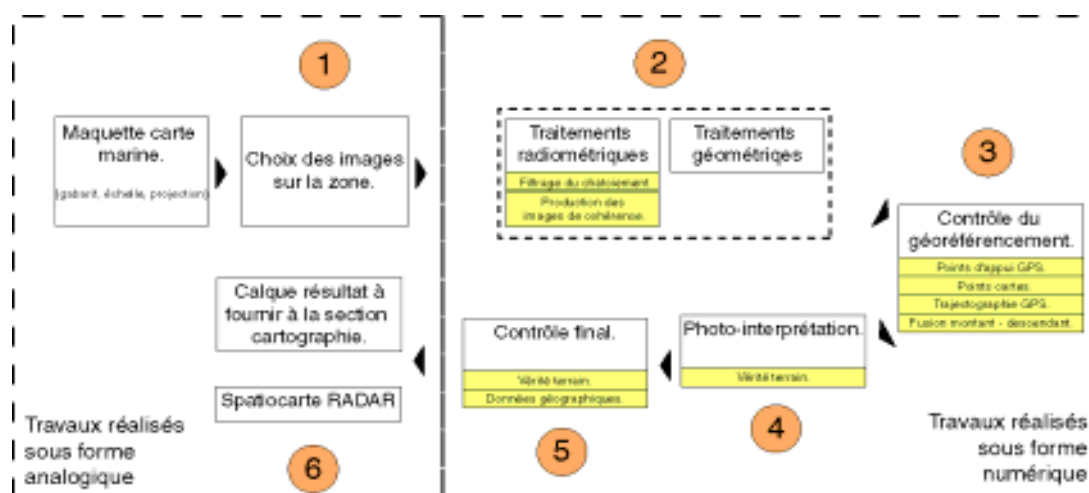


**Figure IV-7 : Traitement des images SAR dans la chaîne de production cartographique du choix des images radar à la fourniture des documents servant à la restitution finale.**

Nous présenterons ici quelques réalisations cartographiques marine à partir des images Radar à Synthèse d'Ouverture, ces travaux sont réalisés par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) qui est l'un des trois organismes cartographiques de l'état française avec l'Institut Géographique National (IGN) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

La carte marine est avant tout un outil de navigation. Elle contient 3 types d'informations : le premier concerne la sécurité du marin en mer (bathymétrie, trait de côte, accès aux chenaux), le second concerne sa localisation de visu sur la frange côtière (présence de phares, reliefs aperçus en mer sur la côte, végétation côtière) et le type de services attendus par le navigateur entrant dans la région avoisinant son mouillage (formes des bassins, réseau routier, agglomérations, toponymie).

Une carte de qualité limite les risques liés à la navigation en mer : naufrages, pollutions marines.

En distinguant 3 classes de réalisation cartographique selon l'échelle retenue pour la réalisation finale (petite, moyenne et grande échelle).

### **Petites échelles (1/500 000) :**

La figure IV.8 représente une Mosaïque RADAR (couverture ERS de 1993 à 1998 de Guyane ). Sur cette spatiocarte à l'échelle du 1/500 000 ont été soulignés le trait de côte et les bancs de vase émergés. On observe très nettement l'emprise de chaque scène utilisée.

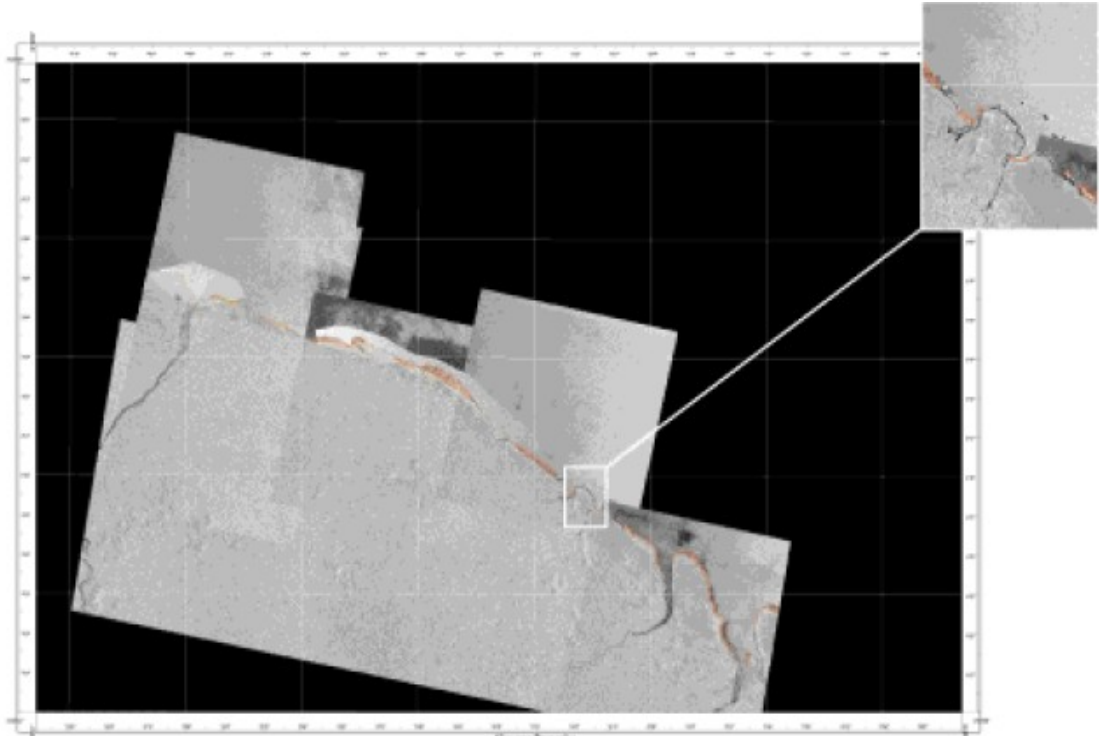


**FIGURE IV.8**

La figure IV.9 représente une Mosaïque RADAR Guyane, couverture 1998–2000. Cette mosaïque ERS a été restituée en effectuant un masquage terre-mer puis en faisant apparaître chaque partie (terre et mer) par de fausses couleurs dans le but de mieux les différencier.

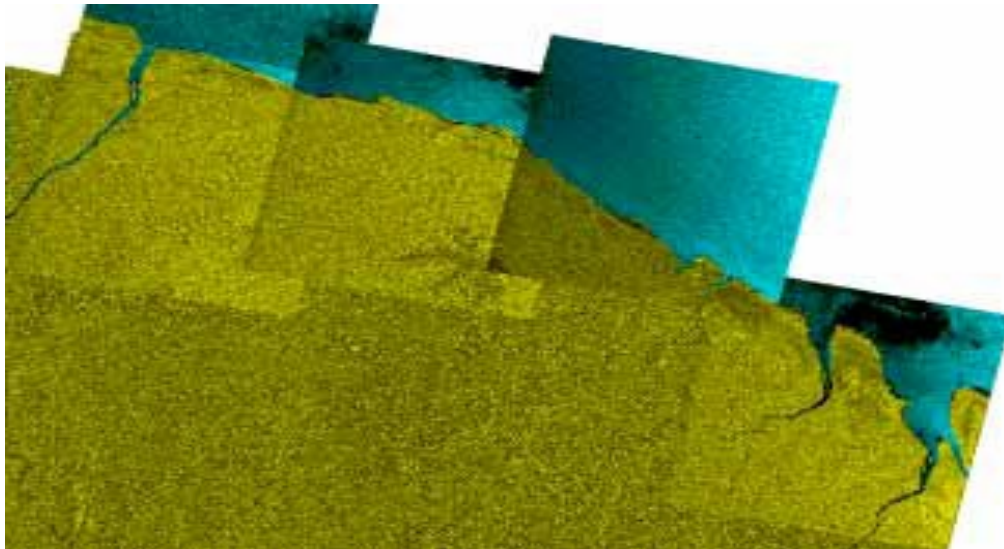


**Figure IV.9**

### **Grand échelle (1/50 000) :**

Trois scènes ERS ont été utilisées pour cette carte. L'interprétation s'est effectuée par fusion multi date (figure IV.10). Les limites du trait de côte, de l'estran et du réseau hydrographique ont été fournies à la section cartographique du SHOM qui a intégré ces données pour produire la carte marine N° 7379 (figure IV.11). Cette carte au 1/50 000 remplace la carte SHOM N° 2386 de 1956.



**Figure IV-10 : Composition colorée sur Cayenne, Canal Rouge scène ERS du 14/11/93, C Bleu 03/05/92.**



**Figure IV-11 : Extrait de la carte SHOM N°7379, Cayenne.**

# CONCLUSION GENERALE

Quels que soient les progrès de la technologie, le radar SAR restera un senseur d'une grande complexité, donc couteux et d'autant plus que le nombre produit à l'échelle mondial reste limité.

Par ailleurs, tout au long de notre étude, nous sommes amenés à démontrer l'intérêt des images radar à ouverture synthétique pour la mise à jour de la cartographie. En cas d'une abondante couverture nuageuse, l'imagerie optique est rendue peu efficace même en zone aride alors que l'acquisition d'une image à l'aide d'un SAR est possible même en présence de vents de sable, de brume sèche pouvant dégrader fortement les images optiques. Les images radar et optiques se révèlent complémentaires car à l'aide de celles-ci, il est possible d'extraire une image de meilleure qualité.

La cartographie SAR permet de souligner les traits structuraux et accentue les phénomènes liés à la topographie et à la géomorphologie. La présente étude nous a permis d'obtenir des résultats qui restent tributaires de paramètres essentiels tels que:

- Un excellent géocodage de toutes les données (l'utilisation d'un modèle numérique d'altitude est nécessaire).
- Un filtrage efficace du speckle des données SAR.
- Une normalisation de toutes les données pour une bonne intégration.
- Et enfin une vérification et une validation des méthodes proposées, mais malheureusement, les données brutes promises ne nous ont pas été transmises.

Cependant, les résultats nous ont montré l'intérêt à combiner différents types de données (points GPS, mode d'acquisition des données) pour une interprétation optimale des états de surfaces (luminosité, rugosité, géométrie, etc.)

Ce travail nous a permis d'acquérir une vue d'ensemble sur ce type de radar utilisé dans divers domaines ainsi que leurs traitements spécifiques.

## Parameter File (e2\_10001\_2925.PRM)

### file information/format

|                |   |                   |                                              |
|----------------|---|-------------------|----------------------------------------------|
| input_file     | e | 2_10001_2925.fix  | name of raw data file                        |
| SC_identity    |   | 2                 | (1) – ERS-1 or (2) – ERS-2                   |
| bytes_per_line |   | 11644             | number of bytes in row of raw data           |
| first_sample   |   | 206               | 412 bytes of timing information to skip over |
| fd1            |   | 248.115           | Doppler centroid estimated from data $fDc$   |
| I_mean         |   | 15.504000         | mean value of real numbers                   |
| Q_mean         |   | 15.549000         | mean value of imaginary numbers              |
| icu_start      |   | 2576039268.848    | spacecraft clock for first sample            |
| SC_clock_start |   | 1997078.767881851 | UTC for first sample YYYYDD.DDDDDDDDD        |
| SC_clock_stop  |   | 1997078.768074699 | UTC for last sample YYYYDD.DDDDDDDDD         |

### radar characteristics

|               |             |                            |       |
|---------------|-------------|----------------------------|-------|
| PRF           | 1679.902394 | pulse repetition frequency | $PRF$ |
| rng_samp_rate | 1.89625e+07 | range sampling rate        | $fs$  |

|                  |             |                  |           |
|------------------|-------------|------------------|-----------|
| chirp_slope      | 4.17788e+11 | chirp slope      | $k$       |
| pulse_dur        | 3.712e-05   | pulse duration   | $\tau p$  |
| radar_wavelength | 0.056666    | radar wavelength | $\lambda$ |

### orbital information

|              |               |                                      |            |
|--------------|---------------|--------------------------------------|------------|
| near_range   | 829924.365777 | distance to first range bin          | $R_{near}$ |
| earth_radius | 6371746.4379  | earth radius 1/2 way into image      | $R_e$      |
| SC_height    | 787955.52     | spacecraft height 1/2 way into image | $H$        |
| SC_vel       | 7125.0330     | ground-track velocity                | $V$        |

### processing information

|              |      |                                                 |  |
|--------------|------|-------------------------------------------------|--|
| num_valid_az | 2800 | size of patch to process                        |  |
| num_patches  | 10   | number of patches to process                    |  |
| first_line   | 1    |                                                 |  |
| deskew       | n    | deskew (yes or no)                              |  |
| st_rng_bin   | 1    | start processing at row number                  |  |
| num_rng_bins | 6144 | number of range bins in output file             |  |
| chirp_ext    | 614  | extend the chirp to process outside swath       |  |
| Flip_iq      | n    | exchange real and imaginary numbers (yes or no) |  |
| nlooks       | 1    | number of azimuth echoes to average             |  |

### image alignment

|             |           |                                        |  |
|-------------|-----------|----------------------------------------|--|
| rshift      | 15.1      | range shift to align image to master   |  |
| ashift      | 483.2     | azimuth shift to align image to master |  |
| stretch_r   | .0014569  | range stretch versus range             |  |
| stretch_a   | -.0019436 | azimuth stretch versus range           |  |
| a_stretch_r | 0.0       | range stretch versus azimuth           |  |
| a_stretch_a | 0.0       | azimuth stretch versus azimuth         |  |

### *Cartographie (Cartography)*

1. Art, science et technologie portant sur la création des cartes topographiques ou thématiques en vue de représenter des distributions spatiales sur certaines régions de la terre. Elle intervient à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration ainsi que de l'interprétation de cartes, plans et autres modes d'expression.

### *Cartographie thématique (Thematic mapping)*

Forme de cartographie sur ordinateur utilisant des informations stockées dans des applications de type tableur ou dans une base de données et permettant de réaliser des documents cartographiques (électroniques ou imprimés) à des fins de présentation.

### *DEM = Digital Elevation Model (Modèle de terrain)*

Un modèle de données utilisé pour représenter une surface topographique, souvent basé sur une grille où l'on connaît la hauteur de chaque cellule ou un ensemble de triangles irréguliers.

### *Données cartographiques numérisées (Digital map data)*

Positions géographiques (coordonnées) et formes géométriques des entités cartographiques, stockées dans format exploitable sur ordinateur.

### *Données géographiques*

Informations renseignant sur les objets observés à la surface de la Terre. Elles incluent des données spatiales\* (point, ligne ou surface) ayant une signification physique (par ex.: mobilier urbain, parcelle cadastrale).

### *Données géoréférencées (Street-based mapping)*

Forme de cartographie sur ordinateur qui associe les données à des positions géographiques et représente sur une carte les adresses localisées par des entités ponctuelles.

### *Fond de carte (Background map)*

Carte utilisée pour la mise en place (localisation et délimitation) d'éléments dans une nouvelle carte.

### *Géocodage (Geocoding)*

Traitement qui consiste à attribuer des coordonnées x, y à des données qui ne sont pas dans un format spatial.

### *GPS = Global Positioning System*

1. Système de positionnement, à l'échelle du Globe, sur un ensemble de satellites artificiels.
2. Un appareil qui permet de trouver une position géographique par l'intermédiaire de signaux radio communiquant avec des satellites (quatre généralement). La précision de ce positionnement peut varier de quelque centaines de mètres à quelques millimètres.

### *Grille (Grid)*

Structure et format utilisé pour la représentation d'information géographique. Une grille est composée d'un ensemble de mailles carrées (cellules) de mêmes tailles et organisées

en lignes et en colonnes. A chaque cellule est associée une valeur numérique entière ou décimale. Les grilles sont toujours orientées suivant les axes du système de référence spatiale.

### *MNT = Modèle Numérique de Terrain (DEM = Digital Elevation Model)*

Représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle numérique peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules).

### *Pixel ou cellule ou taxon (Picture element)*

1. Plus petite unité de définition d'une image écran (image élémentaire).
2. Plus petit élément d'une représentation visualisée auquel peuvent être affectés séparément des attributs tels luminosité, couleur, clignotement.
3. Surfaces rectangulaires de taille arbitraire composant une grille numérique.

### *Projection cartographique (Map projection)*

1. Représentation géométrique de la surface courbe de la Terre sur une surface plane comme une feuille de papier.
2. Formule mathématique qui convertit les positions de latitude et de longitude sur la surface courbe (sphérique) de la Terre en positions x,y sur la surface plane de la carte. Les projections cartographiques altèrent une ou plusieurs des propriétés spatiales suivantes : distance, surface, forme et direction.

### *Relief :*

Configuration physique de la surface de la Terre représentée sur une carte topographique au moyen de courbes de niveau.

### *SHOM :*

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine est l'un des trois organismes cartographiques de France avec l'Institut Géographique National (IGN) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

## *SIG = Système d'Information Géographique(GIS = Geographic Information System)*

1. Ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale utilisés pour saisir, conserver, extraire, mesurer, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification.
2. Logiciel informatique offrant des capacités de cartographie numérique, de gestion de base de données et d'analyse spatiale. Il permet d'afficher, interroger, actualiser et analyser des données localisées (points géographiques) et les informations qui leur sont associées.
3. Base de données géographiques et apparentées, en général relative à une région déterminée plus ou moins étendue.

### *Télédétection(Remote Sensing) :*

La science d'acquisition et de traitement de l'information relative à l'environnement terrestre, en particulier celle concernant les ressources naturelles, par l'utilisation de données photographiques ou apparentées, acquises à l'aide d'avions ou de satellites. Ses instruments saisissent et interprètent l'information portée par les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire, la lumière visible, les ondes infrarouges ou radar. La télédétection permet d'observer et collecter des informations sur de grands espaces, ainsi que d'analyser et de traiter ces données pour en faciliter l'interprétation. La télédétection permet de saisir, d'identifier, de classifier et d'évaluer des objets, des zones ou des phénomènes. Elle est une importante source de données pour les SIG.

### *Topographie*

1. L'ensemble des éléments naturels et rapportés de la surface représentés collectivement sur les cartes topographiques.
2. Technique qui a pour objet l'exécution, l'exploitation et le contrôle des observations concernant la position planimétrique et altimétrique, la forme, les dimensions et

l'identification des éléments concrets, fixes et durables existant à la surface du sol à un moment donné.

### *Planimétrie*

1. Ensemble des éléments topographiques à l'exclusion du relief.
2. Exécution et exploitation des observations qui conduisent à la représentation en projection plane des détails à deux dimensions du Plan topographique. Par extension, représentation de l'ensemble de ces détails.

[1]- Techniques de l'ingénieur ; principe et élément de base (E 6 650)

2-l'effet doppler-fizeau(V.Theillet et L.Panossian)

3-Thèse doctorat (François-Xavier ESTAGERIE)

4-htm:// Wikipédia- Équation du radar

5-htm:// Synopsis\rad int.

6-Document de Christophe delacourt ; université de Brest, France

7-[www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)

8-Thèse doctorat ; Evaluation du potentiel de la technique PolInSAR pour l'estimation des paramètres physiques de la végétation en conditions satellitaires ; Franck GARESTIER

9-Thèse doctorat ; Restitution du relief `a partir d'images radar par radarclinométrie ; Sophie PAQUERAULT

10-htm:// Wikipédia-Klystron .