

N<sup>o</sup> d'ordre : 10/2008-M/EL

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
« HOUARI BOUMEDIENE »  
FACULTE D' ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

EN ELECTRONIQUE

Spécialité : Traitement du Signal et des Images

Par : **BENAOUICHA KARIM**

Sujet

# GEOCODAGE ET CORRECTION GEOMETRIQUE DES IMAGES RADAR SAR SLC

Soutenu publiquement le 18 mai 2008, devant le jury composé de :

|                                  |                                   |                     |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| M <sup>me</sup> F.YOUCEF ETTOUMI | Professeur (USTHB)                | Présidente          |
| Mr M.BELHADJ-AISSA               | Maître de Conférences (USTHB)     | Directeur de thèse. |
| Mr Y. SMARA                      | Professeur (USTHB)                | Examineur           |
| Mr S.KAHLOUCHE                   | Directeur de Recherche (CTS/ASAL) | Examineur           |
| M <sup>me</sup> A.HADDOUD        | Chargée de Cours (ENPEI RUIBA)    | Invitée             |

# Dédicaces:

Je dédie ce modeste travail À :

- ✚ Mes très chers parents.
- ✚ La mémoire de mes grands-parents.
- ✚ mes frères et sœurs.
- ✚ Mes oncles, tantes, cousins et cousines.
- ✚ tous mes beaux frères et mes belles sœurs et leurs enfants.
- ✚ mes proches.
- ✚ tous mes amis.

## Remerciements

Ce travail a été effectué au laboratoire de Rayonnement et Traitement d'Images de l'Institut d'Electronique et d'Informatique de Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).

Je voudrais tout d'abord remercier tout particulièrement mon promoteur en l'occurrence Monsieur M.BELHADJ-AISSA, Maître de Conférences pour avoir dirigé ce travail et pour les conseils qu'il m'a prodigués.

Je tiens aussi à remercier principalement, Madame Youcef Ettoumi, Professeur à la Faculté d'Electronique et d'Informatique, de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon juré.

Je remercie également Mr. Kahlouche, Directeur de recherche à CTS/ASAL, ainsi que Monsieur Y.SMARA, Professeur à la Faculté d'Electronique et d'Informatique, pour le grand honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame A. Belhadj-Aissa, Professeur à la Faculté d'Electronique et d'Informatique, qui a su me donner, quand il le fallait, les clés pour conduire ce travail à son terme. Je tiens également à lui exprimer toute ma reconnaissance pour l'intensité de son partage et de son soutien.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M.Y.SMARA, professeur à l'Institut d'Electronique et d'Informatique de l'USTHB pour ses conseils.

Je remercie particulièrement Mme A.Kourgli, pour ses conseils et d'avoir corrigé le document.

Merci aussi à tous mes collègues et amis du laboratoire qui se reconnaîtront ici. Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

A celui qui nous à prêter main forte qui guide nos pas,  
Notre bon Dieu Grand merci

## Notation générale:

### Symboles

- $l$  la largeur de l'antenne.
- $L$  la longueur de l'antenne.
- $c$  la vitesse de la lumière.
- $\beta$  la largeur du lobe à  $-3\text{dB}$  en azimut.
- $E$  champ électrique
- $[S]$  La matrice de rétrodiffusion
- $\sigma$  la surface équivalente radar (SER)
- $P_r$  la puissance reçue,
- $P_e$  la puissance émise,
- $G$  le gain de l'antenne,
- $R$  la distance cible-antenne
- $a'$  les pertes atmosphériques.
- $B_{chirp}$  bande passante du chirp.
- $S_n(t)$  la  $n^{\text{ième}}$  impulsion émise par l'antenne.
- $f_0$  la fréquence de la porteuse,
- $f_e$  la fréquence d'échantillonnage en distance.
- $K$  coefficient de modulation,
- $H$  : altitude du satellite,
- $\theta$  : angle du visé,
- $\delta\theta$  : ouverture du lobe en site,
- $\delta\theta_a$  : ouverture du lobe en azimut,
- $\tau$  : durée d'une impulsion,
- $L_f$  : longueur de la portion de terrain illuminée par le radar ou fauchée,
- $l_f$  : largeur de la portion de terrain illuminée par le radar,
- $R_0$  : distance entre le point central de la surface au sol illuminée et l'antenne,
- $V_s$  la vitesse du radar,
- $V_T$  la vitesse de la cible qui est due à la rotation de la terre,
- $\delta_r$  La résolution en distance,
- $\delta_a$  La résolution en azimut,

- $\varphi(t)$  La phase instantanée
- $f_D$  la fréquence Doppler centrale
- $\dot{f}_D$  le taux de variation de la fréquence Doppler,
- $\ddot{\varphi}$  est l'accélération du porteur,
- $V_{st}$  la vitesse relative du satellite,
- $i$  l'angle d'incidence,
- $\omega_e$  est la vitesse angulaire de la terre,
- $a$  et  $b$  correspondent respectivement au demi-grand et demi-petit axe de l'ellipsoïde,
- $G$  est l'altitude locale du géoïde par rapport à cet ellipsoïde,
- $e$  et  $e'$  première et deuxième excentricité respectivement,
- $f'$  est l'aplatissement du l'ellipsoïde,
- lon la longitude géographique,
- lat la latitude géographique,
- $h$  l'altitude qui est la distance à l'ellipsoïde (est la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde),
- $N'$  est l'écart entre l'ellipsoïde et le géoïde (Hauteur du géoïde),
- $H'$ , c'est l'altitude au-dessus du géoïde,
- $\xi$  est angle de l'orientation de l'image par rapport à la direction du pôle nord,
- $\alpha$  est l'inclinaison du plan de l'orbite du satellite,
- $w_t$  et  $w_s$  sont respectivement la vitesse angulaire du la terre et du satellite.

### Acronymes

- BEST : Basic Envisat SAR Toolbox.
- EGM96 : Earth Gravity Model 1996.
- ERS : European Remote Sensing.
- ESA : European Spatial Agency.
- ESRIN : European Space Research Institute.
- FRI : (Fréquences de Répétition des Impulsions) ou *PRF* (Pulse Repetition Frequency).
- GEC : Ellipsoïd Geocoded Image.
- GTC : Terrain Geocoded Image.
- MNT : Model Numérique du Terrain.
- PRI : Precision Image.
- RMS : Root Mean Square
- RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture ( SAR pour Synthetic Aperture Radar).

- SAR.RAW : Sar Raw Data.
- SLC: Single Look Complex.
- UTM :Universal Transvers Mercator.
- WGS-84 : World Geodetic System 1984.

# Sommaire

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction générale</b>   | 1  |
| <b>Chapitre I : Principe de formation des images radar SAR et les distorsions géométriques engendrées.</b> |    |
| I.1. Signal radar  | 4  |
| I.2. Antenne et la polarisation  | 4  |
| I.3. Rétrodiffusion et rugosité  | 6  |
| I.4. Principe d'acquisition d'image radar  | 7  |
| I.5. Résolutions SLAR  | 10 |
| I.6. Traitement SAR  | 12 |
| a. Traitement en distance  | 12 |
| b. Traitement en azimuth   | 13 |
| I.7. Limitations   | 17 |
| I.8. Echantillonnage de l'image radar  | 17 |
| I.9. Caractéristiques de l'image radar   | 18 |
| I.9.1. Amplitude et phase  | 18 |
| I.10. Principe du speckle  | 19 |
| I.11. Étude des déformations géométriques des images radar   | 21 |
| I.11.1. Déformations dues à la visée latérale  | 21 |
| I.11.2. Distorsions géométrique dues au relief   | 22 |
| a. Compression   | 22 |
| b. Basculement   | 23 |
| c. Ombre   | 24 |
| I.11.3. Les migrations   | 25 |
| a. Les migrations linéaires  | 25 |
| b. Les migrations paraboliques   | 26 |
| I.11.4. Les déformations dues aux capteurs   | 28 |
| I.13. Conclusion sur la synthèse des images radar  | 31 |
| <b>Chapitre II : Systèmes de projections et transformation entre les systèmes géodésiques.</b>             |    |
| II.1. Surface topographique  | 32 |
| II.2. Le géoïde  | 32 |
| II.3. L'ellipsoïde   | 33 |
| II.4. Le système géodésique  | 34 |
| II.5. Systèmes de coordonnées  | 35 |
| II.5.1. Coordonnées cartésiennes ou coordonnées tri-rectangulaires   | 36 |
| II.5.2. Coordonnées géographiques  | 36 |
| II.5.3. Coordonnées planimétriques (cartographiques)   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| II.6. Passage entre deux systèmes géodésiques et le changement de système de coordonnées dans le même système géodésique | 38 |
| II.6.1. Passage entre deux systèmes géodésiques  | 39 |
| a. Similitude 3D (Bursa wolf)  | 39 |
| b. Méthode Molodensky  | 40 |
| c. Transformations polynomiales  | 40 |
| II.6.2. Changement de système de coordonnées dans le même système géodésique   | 41 |
| a. Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées cartésiennes  | 41 |
| b. Passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques  | 42 |
| c. Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées planes  | 43 |
| II.7. Classification des projections planes  | 44 |
| a. Projection selon le type de déformations  | 45 |
| b. Projection selon l'aspect   | 45 |
| c. Projection selon le canevas   | 46 |
| • Projection de Lambert  | 47 |
| • Projection UTM   | 49 |

### **Chapitre III : Méthodes de correction géométrique.**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Approche de correction géométrique                                    | 51 |
| III.1.1. Approche analytique   | 51 |
| a. Correction de la déformation due à l'inclinaison de l'orbite du satellite | 51 |
| b. Correction de l'effet de la rotation de la terre                          | 52 |
| III.1.2. Approche polynomiale à modèles de régression                        | 53 |
| a. La méthode exacte   | 53 |
| b. La méthode approximée   | 53 |
| III.1.3. Approche mixte (Hybride)  | 55 |
| III.2. Modélisation de l'orbite  | 57 |
| III.2.1. Modélisation de la position et la vitesse par l'interpolation       | 57 |
| III.2.2. Modélisation des paramètres osculateurs                             | 58 |
| III.3. Mode d'acquisition des images radar SAR                               | 59 |
| III.4. Géolocalisation de la cible   | 60 |
| III.4.1. Equations de localisation   | 61 |
| a. Equation en distance  | 61 |
| b. Equation Doppler  | 62 |
| c. Equation de l'ellipsoïde  | 63 |
| III.5. Le rééchantillonnage radiométrique                                    | 63 |

### **Chapitre IV : Application et résultats**

|                              |    |
|------------------------------|----|
| IV.1. Prestation des données | 66 |
| a. Présentation de MNT       | 66 |

|   |           |
|---|-----------|
| b. Les images radar SLC   | 66        |
| IV.2. Application du processus de correction géométrique                | 67        |
| IV.2.1. Les corrections effectuées en supposant que le terrain est plat | 68        |
| a. Projection au sol et calcul de la résolution en distance             | 68        |
| b. Géolocalisation de la cible dans une image radar                     | 71        |
| c. Construction des polynômes et rectification de l'image               | 73        |
| IV.2.2. Correction des déplacements dus aux reliefs                     | 77        |
| a. Modélisation de l'orbite   | 77        |
| b. Calcul et correction des déplacements de la cible dus au relief      | 80        |
| c. Calcul des nouvelles positions des pixels                            | 82        |
| <b>Conclusion générale</b>  | <b>85</b> |
| <b>Annexes</b>  | <b>85</b> |
| • Annexe A : Les filtres de rééchantillonnage radiométrique             | 88        |
| • Annexe B : Les différents produits de ERS                             | 90        |
| • Annexe C : Datum (système géodésique)                                 | 92        |
| <b>Bibliographie</b>  | <b>93</b> |

## **Introduction Générale :**

L'observation de la terre à partir d'instruments embarqués sur des avions ou des satellites est une technique largement utilisée de nos jours. Les premières images de télédétection spatiale furent obtenues par des capteurs optiques, c'est-à-dire dans le domaine du visible ou de l'infrarouge. Ces capteurs permettent, notamment, d'obtenir des images haute résolution (moins d'un mètre) avec un spectre étendu de longueurs d'onde.

L'inconvénient majeur de ce type de capteurs dits passifs est qu'ils sont dépendants d'une part, d'une source d'illumination (le soleil) de la scène observée, ce qui pose par exemple, de gros problèmes pour observer les régions polaires non éclairées une grande partie de l'année, et d'autre part, de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, qui rend impossible l'observation régulière des régions où la couverture nuageuse est forte (régions tempérées), voire quasi-permanente (régions tropicales et polaires).

La télédétection s'est alors tournée vers des capteurs actifs pour compléter efficacement les capteurs optiques. Le radar, acronyme anglais signifiant "détection et télémétrie par ondes radio" et dont le principe fut formulé en 1889 par Hertz puis vérifié expérimentalement, fut ainsi, utilisé dans les années 1920–1930 pour détecter des bateaux et des avions par temps de brouillard. En effet, un capteur radar émet ses propres ondes et ne requiert donc pas de source d'illumination extérieure au système embarqué. Il utilise de plus des fréquences micro-ondes (typiquement des longueurs d'onde centimètres) qui traversent aisément l'atmosphère, même si elle est saturée en vapeur d'eau. Un radar peut donc être utilisé de jour comme de nuit et quelles que soient les conditions atmosphériques.

Le premier champ d'application du radar fut d'abord militaire. Pendant la seconde guerre mondiale, les pays alliés avaient un avantage technologique grâce à une large gamme de radars, de longueurs d'onde de 1 cm à 10 m, installés pour la plupart en Angleterre. C'est ainsi que les premiers radars imageurs furent mis au point afin d'améliorer la précision des bombardements nocturnes. Après la guerre, les applications civiles se sont largement développées grâce notamment à l'apparition de radars imageurs à haute résolution, basés sur la technique du Radar à Synthèse d'Ouverture (d'où l'acronyme français RSO, dont l'équivalent anglais est SAR pour Synthetic Aperture Radar) introduite au début des années 1950. L'ère des SAR spatiaux civils a véritablement commencé en 1978 avec le lancement du satellite américain Seasat qui a démontré pendant sa brève durée de vie (trois mois) le potentiel de ce type de capteurs pour des applications maritimes et continentales. Suivirent deux missions de quelques jours avec des SAR embarqués sur la navette spatiale: SIR-A , SIR-B et CIR-C ; en 1991 et 1992, trois satellites SAR ont été lancés: le satellite russe Almaz, le satellite européen ERS-1 et le satellite japonais JERS-1. Ces radars SAR possèdent une seule longueur d'onde, une seule polarisation et un angle de

visée constant. Le satellite canadien RADARSAT, lancé le 4 novembre 1995, propose quant à lui plusieurs modes de visée et de polarisation.

Le mode d'acquisition des images radar SAR induit, comme n'importe quel autre système de télédétection, des déformations géométriques de la scène. Généralement, il y a deux grands types de déformations. Les déformations dues à l'électronique de système et le traitement du signal rétrodiffusé, la stabilité du capteur et le système de visée latérale. Il y a aussi les déformations dues à la topographie de terrain (les déplacements dus aux reliefs).

La complexité de la géométrie des images radar SAR et la précision exigée pour l'utilisation de ces images dans divers domaines de recherche et d'application nécessitent une attention particulière quant aux approches et aux processus de correction géométrique des images radar SLC à mètre en ouvre. Ces approches intègrent différents paramètres et données auxiliaires (données orbitales, caractéristiques des capteurs radar, données de références, etc...). Dans ce contexte, nous avons abordé ce domaine par la réalisation d'un processus de correction géométrique basé sur une approche hybride.

Ainsi notre travail, dans ce mémoire, a pour but la correction géométrique des images radar SAR SLC. Ce manuscrit s'articule autour de :

- Le premier chapitre est subdivisé en deux parties. Dans la première, nous passons en revue les principes essentiels de la formation des images radar a ouverture de synthèse (SAR). La deuxième partie est consacrée à la modélisation géométrique, et à l'étude des relations entre l'image et le terrain, ainsi qu'aux distorsions géométriques dues au relief. Ces rappels donnent les éléments importants permettant la compréhension de la géométrie des images radar SAR et leur utilisation dans des applications cartographiques.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des systèmes de projection et les transformations entre les systèmes géodésiques. Cette partie est essentielle pour la modélisation géométrique, et la localisation d'une cible au sol représentée par un pixel dans l'image radar.
- Le troisième chapitre est dédié aux méthodes de correction géométrique. Nous étudions les différentes approches de correction géométrique, nous présentons les différents niveaux de traitements que nous avons étudiés et développés sous forme d'un processus de correction géométrique.
- Nous présentons, dans le quatrième chapitre la méthode développée et les résultats obtenus par l'application de processus sur les images acquises par le radar ERS1/2 de la région d'Alger. Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale où nous

donnons quelques perspectives à ce travail qui reste ouvert, en mettant l'accent sur le problème de la géométrie et de la localisation des cibles (les trois équations) qui est loin d'être résolu.

## **Chapitre I :**

**Principe de formation des images  
radar SAR et les distorsions  
géométriques engendrées.**

La formation des images radar SAR relève à la fois de la physique (propagation des ondes électromagnétiques) et du traitement du signal (la synthèse d'ouverture). Généralement, les produits de ce traitement, tels les images radar SAR SLC, sont entachés d'erreurs ou bien de distorsions géométriques. Pour cela, nous avons, d'abord mené une étude sur l'acquisition et la formation d'images radar, ensuite nous avons étudié les différentes distorsions géométriques qui affectent les images radar SAR SLC.

### I.1. Signal radar :

Le signal radar non synthétisé est une mesure d'onde électromagnétique qui est fonction des propriétés de la scène et de l'onde. Le choix des paramètres du capteur (taille de l'antenne et durée d'impulsion) influe sur la résolution du signal radar [3, 21, 12].

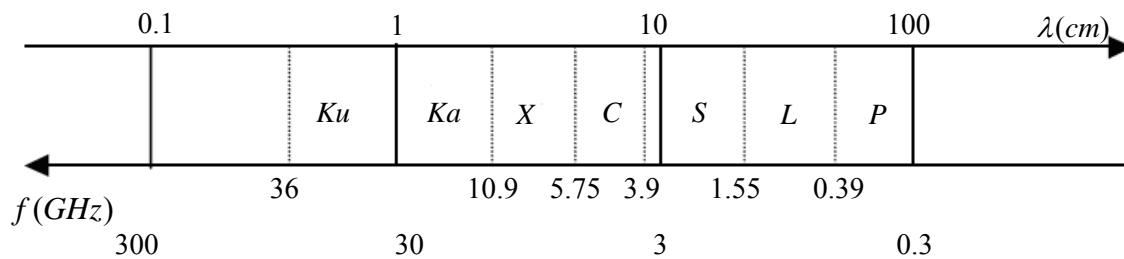


Figure I.1 : Les ondes radar.

L'onde radar s'étale sur les longueurs d'onde centimétriques des micro-ondes (figure I.1) et se propage à la vitesse de la lumière  $c$ . Les phénomènes d'interaction de l'onde avec l'environnement dépendent de la longueur d'onde et de l'état de la surface [9]:

- Propagation : de la bande  $L$  à  $X$  l'atmosphère est quasiment transparente. Vers la bande  $Ku$ , la propagation est atténuée dans la troposphère (entre 0 et 15km) où se concentrent les nuages. Vers la bande  $P$ , elle est atténuée dans l'ionosphère (altitudes supérieures à 100km).
- Pénétration de l'onde et sensibilité à la rugosité de la surface éclairée : Plus la longueur d'onde augmente, plus la sensibilité aux détails diminue et la pénétration augmente. L'onde radar pénètre, ainsi, le sable, la végétation, les nuages, etc. Cependant la pénétration diminue avec l'humidité.

### I.2. Antenne et la polarisation :

L'antenne est généralement de forme plane rectangulaire directive de largeur  $l$  et de longueur  $L$ . Elle rayonne une onde dans son plan orthogonal avec une direction privilégiée. La fauchée est le lobe principal du diagramme d'antenne sur le sol (figure I.3).

La taille de la fauchée dépend de  $l$  en distance et de  $L$  en azimut. L'ouverture de l'antenne en azimut est donnée par la largeur du lobe à  $-3\text{dB}$  :  $\beta = 0.886 \frac{\lambda}{L}$  où  $\lambda$  la longueur d'onde [9]. Une antenne est d'autant plus directive (ouverture étroite) qu'elle est grande et que  $\lambda$  est petite. L'antenne peut émettre une onde polarisée. Une onde polarisée horizontalement, notée  $h'$  (respectivement verticalement,  $v'$ ) a un champ électrique parallèle (respectivement orthogonale) à la trajectoire [21]. La figure I.2 représente un exemple de polarisation verticale d'une onde électromagnétique. L'équation générale du champ électrique dans un repère  $(o, \overset{\omega}{x}, \overset{\omega}{y}, \overset{\omega}{z})$  s'écrit comme suit :

$$\overset{P}{E}(x, y, z) = E_x(x, y, z)\overset{P}{x} + E_y(x, y, z)\overset{P}{y} + E_z(x, y, z)\overset{P}{z} \quad (\text{I.1})$$

Où  $\overset{P}{E}$  est le champ électrique associé à l'onde et  $\overset{\omega}{H}$  représente le champ magnétique.

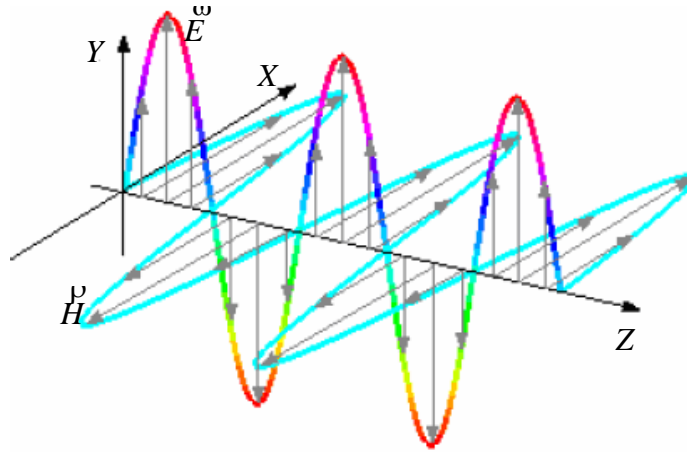


Figure I.2 : Exemple de polarisation verticale d'une onde électromagnétique.

Indépendamment de l'onde émise, l'onde rétrodiffusée est dépolarisée en deux composantes,  $h'$  et  $v'$ . Suivant les polarisations émises et reçues, on définit quatre types de polarisations radar :  $h'h'$ ,  $h'v'$ ,  $v'h'$  et  $v'v'$ .

Les images  $h'h'$  et  $v'v'$  sont dites copolaires et les autres contrapolaires [34]. La matrice de rétrodiffusion  $[S]$  reliant l'onde émise par le radar à l'onde reçue par celui-ci est définie comme suit [35] :

$$\begin{bmatrix} E_{rv'} \\ E_{rh'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{v'v'} & S_{v'h'} \\ S_{h'v'} & S_{h'h'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{iv'} \\ E_{ih'} \end{bmatrix} \quad (\text{I.2})$$

Schématiquement, l'état de polarisation  $v'$  est émis dans un premier temps. A la réception, deux mesures sont obtenues : la composante copolarisée  $S_{v'v'}$  et la composante croisée  $S_{h'v'}$ . Puis l'état de polarisation orthogonale  $h'$  est émis, deux nouvelles mesures sont obtenues :  $S_{v'h'}$  et  $S_{h'h'}$ . La

matrice de rétrodiffusion est alors complète. Les éléments  $S_{ij}$  de la matrice  $[S]$  dépendent des caractéristiques de la scène, notamment géométriques (rugosité) et diélectriques (humidité), mais également de la fréquence de l'onde et de la position de l'émetteur et du récepteur par rapport à la scène [34]. L'aspect polarimétrique de l'onde radar fournit des informations sur le mécanisme de rétrodiffusion. Ceci conduit à une discrimination des différents types de terrain entre eux à partir des matrices de rétrodiffusion par une classification des états de surface du terrain.

### I.3. Rétrodiffusion et rugosité :

Le radar, étant un capteur actif, émet des ondes électromagnétiques polarisées et mesure l'onde rétrodiffusée dans une polarisation donnée. La réponse en amplitude et en phase dépend de l'onde émise et de la surface équivalente radar  $\sigma$  (SER) qui est associée à chaque pixel. La SER est la surface de l'antenne, de gain unité, qui rayonnerait comme la cible et elle est fonction de la longueur d'onde  $\lambda'$ , de la permittivité  $\varepsilon$  et de l'angle d'incidence  $i$  [21]. L'équation radar permet de la déduire des paramètres de l'antenne et de la puissance de l'onde reçue est donnée par [3]:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 a' P_r}{G^2 \lambda^2 P_e} \quad (I.3)$$

Où  $P_r$  est la puissance reçue,  $P_e$  la puissance émise,  $G$  le gain de l'antenne,  $R$  la distance cible-antenne et  $a'$  les pertes atmosphériques. On définit le coefficient de rétrodiffusion  $\sigma_0$  comme la SER par unité de surface. L'intensité lue dans l'image est proportionnelle à  $\sigma_0$ . Sans l'information altimétrique, l'angle d'incidence locale est inconnu et par conséquent le coefficient de rétrodiffusion est estimé en supposant la surface plane située à une altitude moyenne donnée. Les erreurs induites sur la radiométrie des pixels par ces deux hypothèses peuvent être mesurées et corrigées connaissant la donnée altimétrique; modèle numérique du terrain. La puissance reçue est plus ou moins grande selon la rugosité de la surface. Pour une surface horizontale et une visée latérale, il ne peut y avoir de signal rétrodiffusé que si la surface est rugueuse. En effet, une surface lisse réfléchit les ondes uniquement dans la direction spéculaire. Par exemple, un plan d'eau sans vague aura une amplitude quasi-nulle dans les images. Plus une surface plane sera rugueuse, plus la proportion de l'onde rétrodiffusée augmente. Le critère de Rayleigh permet de déterminer si une surface doit être considérée comme rugueuse ou non au regard de la longueur d'onde  $\lambda$ . Ce critère prend en compte l'écart-type des hauteurs de la surface  $\sigma_h$  et l'angle d'incidence  $i$ . Une surface est rugueuse si [9]:

$$\sigma_h \gg \frac{\lambda}{8 \cos(i)} \quad (I.4)$$

#### I.4. Principe d'acquisition d'image radar :

Le système radar à visée latérale délivre des impulsions d'énergie, chacune illuminant une région sur la surface de la terre (empreinte). Ces impulsions sont émises à un rythme régulier couramment appelé FRI (Fréquences de Répétition des Impulsions) ou *PRF* (Pulse Repetition Frequency) de sorte qu'une même région au sol soit illuminée de nombreuses fois, permettant ainsi de procéder au traitement de la synthèse d'ouverture [30]. Les points du sol éclairés par l'onde sont repérés dans l'image par leur distance à l'antenne. Ainsi, les colonnes de l'image synthétisée définissent l'axe des distances antenne-cible et les lignes, l'axe azimutal des positions successives de l'antenne (figure 1.3).

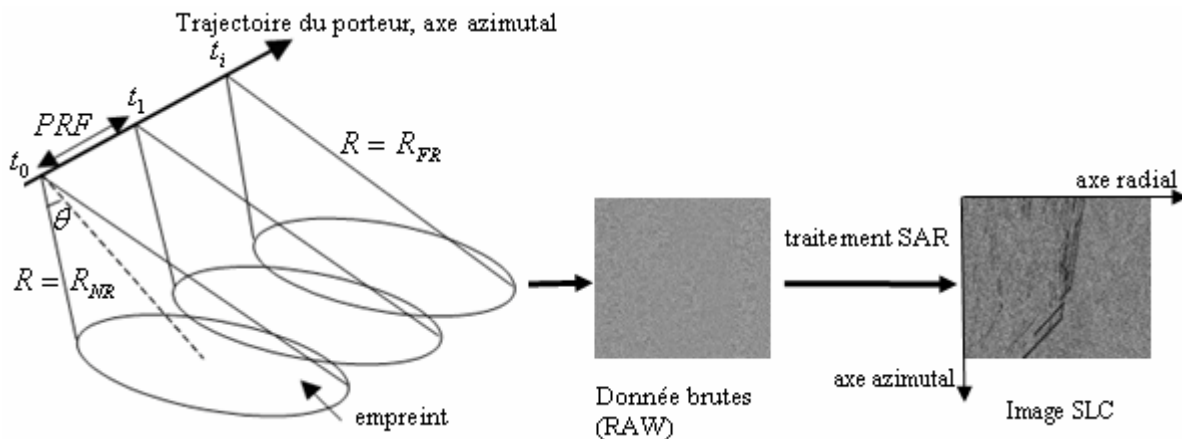


Figure I.3 : Principe d'acquisition des images radar.

La forme de l'onde émise par le radar est donc composée de  $N$  impulsions de durée  $\tau$ , et de bande passante  $\Delta f = B_{chirp}$  [21, 12]. Ces impulsions sont espacées d'un intervalle  $\Delta \tau$  en temps. La forme mathématique de la  $n^{\text{ième}}$  impulsion est donnée par l'équation I.5 [2, 12] :

$$s_n(t) = \begin{cases} a(t) \cos(2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2)) & \text{pour } |t| < \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (I.5)$$

Où  $a(t)$  l'enveloppe des impulsions,  $f_0$  la fréquence de la porteuse,  $K$  coefficient de modulation de la fréquence tel que  $K = \frac{B_{chirp}}{\tau}$  [12] et  $t$  le temps mesuré à partir du centre de l'émission d'une impulsion ( $t_c = n\Delta \tau$ ).

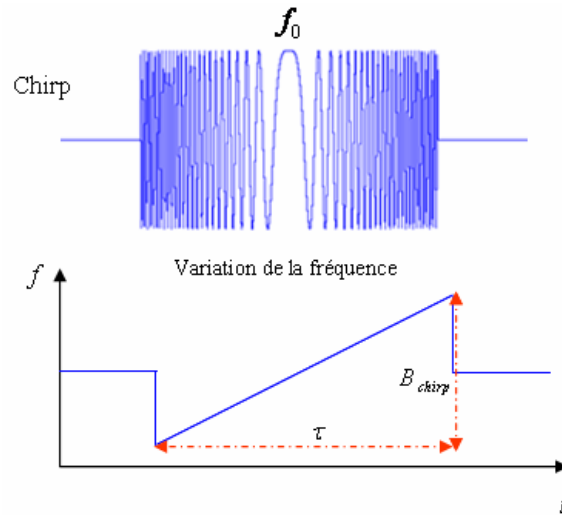


Figure I.4: Signal lineairement module en fréquence : chirp

A partir de la Figure.I.5 schématisant le principe de visée du radar, définissons un certain nombre de paramètres [32]:

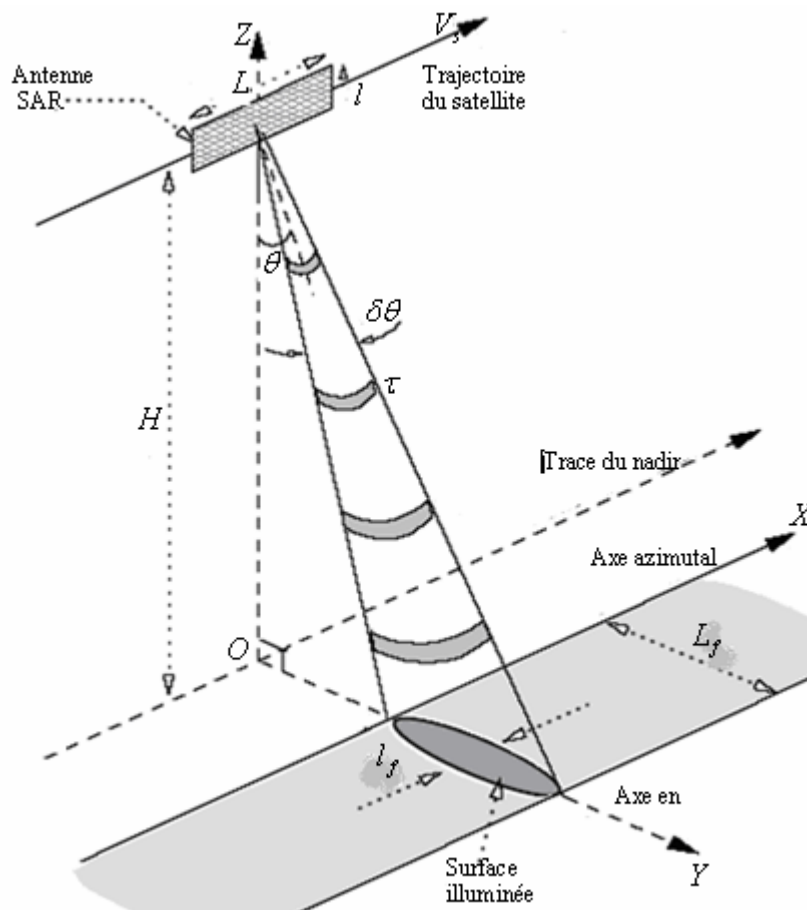


Figure I.5 : Principe d'acquisition d'image radar.

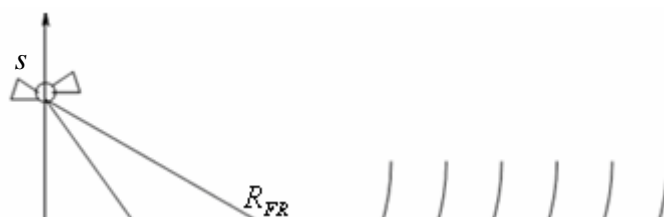
- $H$  : altitude du satellite,

- $V_s$  : vitesse du satellite,
- $\theta$  : angle du visée,
- $\delta\theta$  : ouverture du lobe en site,
- $\delta\theta_a$  : ouverture du lobe en azimut,
- $L_f$  : longueur de la portion de terrain illuminée par le radar ou fauchée,
- $l_f$  : largeur de la portion de terrain illuminée par le radar,
- $R_0$  : distance entre le point central de la surface au sol illuminée et l'antenne,
- $OY$  : axe horizontal perpendiculaire à la trajectoire du satellite et appelé axe en site (ou distance),
- $OX$  : axe azimutal, axe au sol parallèle à la trajectoire du satellite,
- $OZ$  : axe du nadir.

Le capteur, à bord d'un satellite, émet une onde et enregistre l'onde rétrodiffusée à partir de l'instant  $t_0$  pendant une durée  $\Delta T$ . L'ensemble de ces mesures forme une ligne de l'image : elle correspond à une zone au sol dont la distance au capteur est comprise entre  $R_{NR} = ct_0$  et  $R_{FR} = c(t_0 + \Delta T)$  (figure : I.6).

Les dénominations *NR*(Near Range) et *FR*(Far Range) désignent alors le premier point imagé et le dernier point imagé sur une image. Le porteur avance ensuite d'une distance  $\frac{V_s}{PRF}$ .

Il émet une nouvelle onde et acquiert donc la ligne suivante (figure I.3). Le déplacement du porteur assure le balayage de la scène en azimut.  $t_i = t_0 + \frac{i}{F_{prf}}$  où  $t_i$  est le temps d'acquisition de  $i^{\text{ème}}$  ligne (figure I.3) [3].



## **I.5. Résolutions SLAR :**

La résolution est la distance minimale requise entre deux points du sol pour être discriminés dans l'image en distance ou en azimut. Les résolutions SLAR sont celles avant le traitement SAR.

- **Résolution en distance :**

La résolution en distance (figure I.7) est définie comme étant la distance minimale qui permet de distinguer séparément deux cibles voisines par un même système radar. Deux cibles éclairées à des instants proches renvoient chacune un écho de même durée  $\tau$  que celle de l'impulsion émise. Ils peuvent être séparés si le second écho est reçu alors que la réception du premier est finie. Notons  $R$  la distance entre l'antenne et la première cible et  $R + \delta$  la distance avec la seconde cible. L'onde effectue un trajet aller-retour, la différence entre les instants de début de réception des deux échos vaut  $2\delta/c$ . Cette durée doit être supérieure à  $\tau$ , d'où la résolution en distance (au demi-lobe de la réponse impulsionnelle) [3] :

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} \quad (I.6)$$

La résolution en distance dépend donc de la durée de l'impulsion émise.

- **Résolution en azimut :**

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  $\delta_a$  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 I.8). De ce fait, la résolution azimutale correspond à la largeur de l'empreinte au sol du faisceau [3].

$$\delta_a = \beta \cdot R = \frac{\lambda \cdot R}{L} \quad (I.7)$$

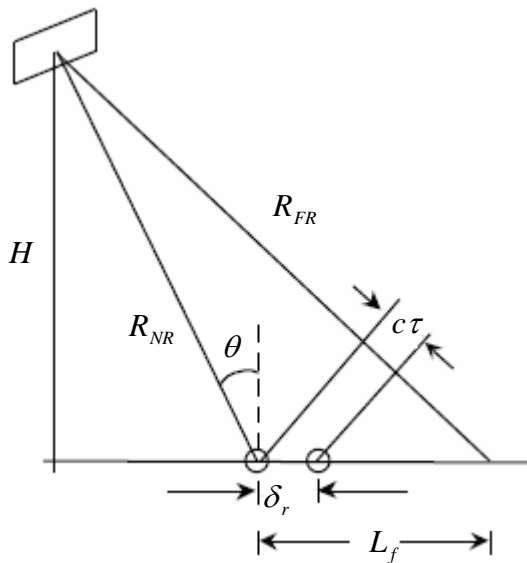


Figure I.7 : Résolution en distance.

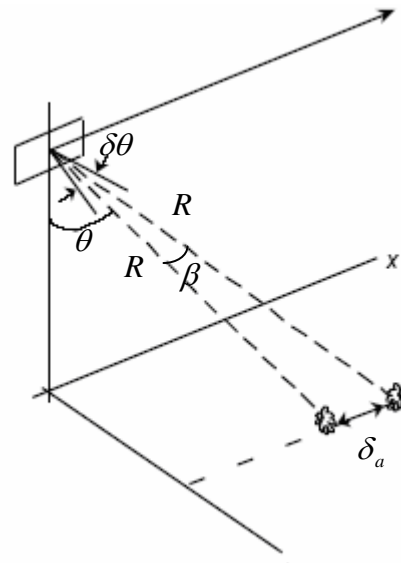


Figure I.8 : Résolution en azimuth.

Par analogie, si on considère les mêmes paramètres d'un radar imageur tel que ERS1/ERS2 à savoir :  $\tau$  est de  $37.1 \mu\text{s}$ ,  $\lambda=5.66\text{cm}$ , l'altitude du satellite est  $785 \text{ Km}$ , la longueur de l'antenne est  $L=10\text{m}$ . On trouve respectivement les deux résolutions en distance et en azimuth au centre de la scène ( $\theta=20^\circ$ ) comme suite :  $\delta_r=5.565 \text{ Km}$  et  $\delta_a=4.5 \text{ Km}$ .

Ces résolutions dépendent essentiellement de la dimension de l'antenne et de la durée de l'impulsion. Pour les améliorer il y a eu lieu le développement de radar à synthèse d'ouverture.

## I.6. Traitement SAR :

### a) Traitement en distance :

Pour obtenir une fine résolution, la durée d'une impulsion  $\tau$  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'une fonction "chirp" (équation I.5), est couramment employée ce qui permet d'obtenir une résolution en distance bien plus fine. Ce dernier est modulé linéairement en fréquence autour d'une fréquence centrale  $f_0$ .

Le signal reçu doit ensuite être démodulé pour retrouver la réponse de la cible. Pour cela, un filtrage adapté est appliqué dont la réponse impulsionnelle est de la forme [2, 3] :

$$h(t) = s^*(-t) \tag{I.8}$$

Où  $s^*(-t)$  est le conjugué de  $s(-t)$ .

Le signal détecté d'une cible ponctuelle située à une distance  $c.t_c$  du capteur, en première approximation, est donné par l'équation (I.9), cette dernière correspond à un sinus cardinal, qui est représentée par la figure I.9 [2, 3, 30].

$$s_{t_c}(t) = e^{j2\pi.f_0.(t-t_c)} \tau \text{ sinc}(\pi k \tau (t - t_c)) \tag{I.9}$$

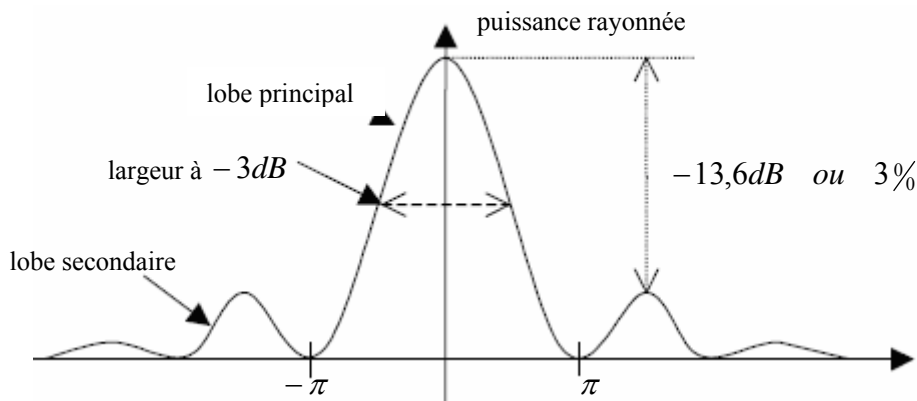


Figure I.9 : Sinus cardinal et la largeur à -3dB.

La résolution peut être par rapport à plusieurs références, tout en faisant appel à la largeur du lobe principal du sinus cardinal exprimée par l'équation 1.9. La largeur du sinus cardinal à -3dB est donnée en fonction du coefficient de modulation de la fréquence  $k$  [3, 5].

$$\frac{1}{K \tau} = \frac{1}{B_{chirp}} \tag{I.10.a}$$

Ainsi, la résolution en distance du signal démodulé est :

$$\delta_r = \frac{c}{2.B_{chirp}} \tag{I.10.b}$$

Un des avantages primordial de cette expression est son indépendance vis-à-vis de la distance d'observation et de la durée  $\tau$  de l'impulsion émise, mais elle dépend uniquement de la largeur de la bande passante de la fonction chirp.

### b) Traitement en azimuth :

Le facteur limitant la résolution en azimuth est la grande ouverture de l'antenne. La solution la plus simple est d'accroître la taille de l'antenne, mais les systèmes aéroportés et spatiaux ne peuvent s'accommoder de dispositifs aux grandes dimensions.

La solution s'est présentée en inversant le problème : plutôt que de chercher à réduire la taille de l'antenne, il est plus intéressant de l'augmenter, par la simulation d'une antenne virtuelle. Le principe est que si le porteur se déplace lentement (par rapport à la vitesse de la lumière), les zones d'illuminations vont se recouvrir en partie. Chaque cible est éclairée de nombreuses fois par l'antenne (figure I.10) [3, 7, 34].

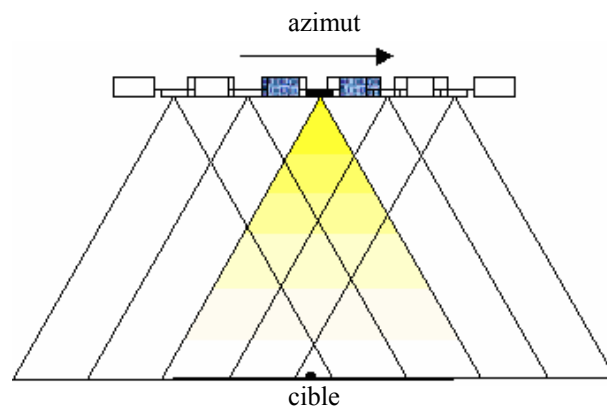
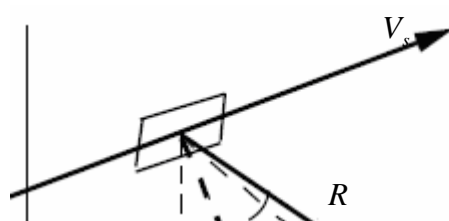


Figure I.10: L'antenne virtuelle.

L'information la concernant se retrouve donc répartie sur plusieurs lignes mais si une méthode permettait de soustraire la contribution des autres cibles, il serait possible de synthétiser une antenne beaucoup plus grande et, par la même, d'obtenir une antenne virtuelle, extrêmement directive. C'est le principe même de la compression en azimuth [3].

On peut améliorer cette résolution en utilisant l'effet Doppler qui est du au déplacement de la plate forme (figure I.10). En effet, lorsqu'un point du terrain commence à être éclairé, il est en avant du radar et renvoie donc une fréquence légèrement supérieure à la fréquence porteuse. Après la fréquence Doppler diminue, elle s'annule lorsque la cible se trouve dans la direction perpendiculaire à la trajectoire de la plate forme, puis elle devient négative lorsque le point est à l'arrière du radar [33].



L'expression de  $R$  (distance entre le radar et la cible) en fonction de  $R_0$  (figure I.11) s'écrit comme suit [7, 33] :

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + x^2} = \sqrt{R_0^2 + V_s^2 t^2} \quad (\text{I.11.a})$$

On a  $R_0 \gg V_s t$ , par le développement limité au deuxième ordre on peut écrire :

$$R(t) \cong R_0 + \frac{V_s^2 t^2}{2R_0} \quad (\text{I.11.b})$$

Soit un signal de longueur d'onde  $\lambda$  et de fréquence  $f_0$ , émis par un capteur se déplaçant à la vitesse  $V_s$ . La phase instantanée  $\varphi(t)$  de l'onde rétrodiffusée est donnée par [3, 34] :

$$\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} 2R(t) \quad (\text{I.12.a})$$

Un développement limité à l'ordre deux de la phase autour du temps  $t_0$  permet d'écrire la phase du signal en azimuth sous la forme [22] :

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R(t_0) + 2\pi(t-t_0) \left[ \frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} \right]_{t_0} + \pi(t-t_0)^2 \left[ 2 \cdot \frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R(t)}{dt^2} \right]_{t_0} \quad (\text{I.12.b})$$

$f_D$   $f_D$

Où l'on fait apparaître les termes de la phase liés à l'effet Doppler.

- **Fréquence Doppler centrale :**

Dans l'équation (I.12.b) Le terme  $f_D$  est appelé fréquence Doppler centrale, et représente une variation de fréquence de l'onde rétrodiffusée induite par le mouvement du porteur (Squint).

Lors de la traversée du lobe d'antenne par le point terrain M à  $t_0$ , le mouvement du porteur peut, en première approximation, être considéré comme inscrit dans un plan. On peut alors se ramener à la description bidimensionnelle illustrée par la figure I.12 où l'angle  $\alpha$  permet le passage du repère d'axes  $(\overset{p}{u}, \overset{p}{v})$  au repère de référence. Explications de la fréquence Doppler centrale en exprimant la dérivée de la distance porteur-point visée sous la forme [22]:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR^{\overset{p}{p}}}{dt} = \overset{p}{u} \frac{dR^{\overset{p}{p}}}{dt} + R \frac{d\overset{p}{u}}{dt} \quad (\text{I.13})$$

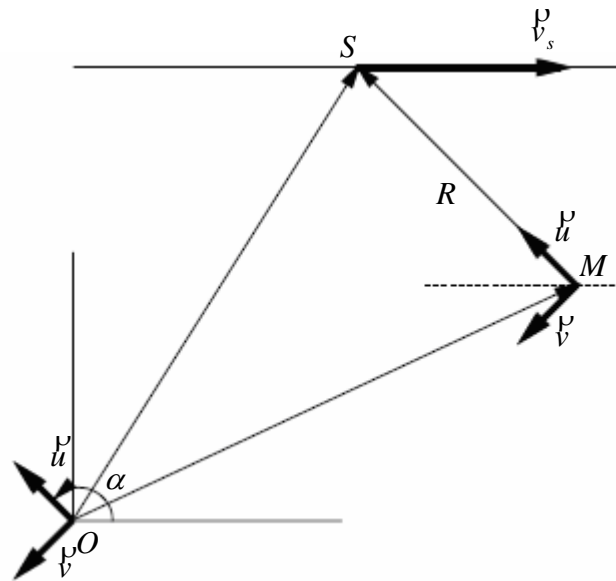


Figure I.12 : Equation Doppler radar.

Le deuxième terme de l'équation I.13 est nul on peut alors écrire (axes  $\overset{p}{u}, \overset{w}{v}$  perpendiculaires) [22]:

$$R \frac{d\overset{p}{u}}{dt} = R \frac{d\overset{w}{v}}{dt} = 0 \quad (\text{I.14.a})$$

Si on néglige le mouvement de la cible relativement au repère de référence, il vient :

$$\frac{dR^{\overset{w}{p}}}{dt} = \overset{p}{u} V_s \quad (\text{I.14.b})$$

Ceci permet d'écrire l'équation relative à la fréquence Doppler centrale sous la forme :

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{\overset{p}{u} V_s}{R} \quad (\text{I.15.a})$$

Si on prend en considération le mouvement de la cible, la fréquence Doppler centrale s'écrit sous la forme [22, 17]:

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{R \dot{V}_s \dot{V}_t}{R} \quad (\text{I.15.b})$$

- **Taux de variation de la fréquence Doppler :**

Le terme  $\dot{f}_D$  qui est appelé taux de variation de la fréquence Doppler s'exprime, suite à des calculs analogues aux précédents, et avec les mêmes approximations, sous la forme [22]:

$$\dot{f}_D = \frac{2}{\lambda} \frac{R \dot{V}_s + \|V_s\|^2}{R} \quad (\text{I.16})$$

Où  $\dot{V}_s$  est l'accélération du porteur, et où les grandeurs  $R, V_s$  et  $\dot{V}_s$  sont prises au temps  $t_0$ .

Remarquons, que la dérivation relativement au temps de la fréquence Doppler centrale donnée par l'équation I.15.b, conduit à l'équation I.16, ce qui justifie la dénomination de ce terme.

La fréquence Doppler s'exprime alors :

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} f_0 - \frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} = f_0 + f_D$$

$$f_D = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2V_s^2}{\lambda R_0} t \quad (\text{I.17})$$

On constate la linéarité de la relation liant la  $f_D$  au temps. De plus la largeur de la bande Doppler  $B_D$  s'exprime en fonction de la vitesse  $V_s$  de la plate forme et de la dimension de l'antenne  $L$  [22]:

$$B_D = \frac{2V_s}{L} \quad (\text{I.18})$$

En effet, la résolution azimutale théorique dépend de la largeur de la bande d'acquisition Doppler [5].

$$\delta_a = V_s \frac{1}{B_D} = \frac{L}{2} \quad (\text{I.19})$$

Cette relation est la propriété fondamentale du radar à ouverture synthétique. Elle a 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.

## I.7. Limitations :

Dans le traitement précédent on a supposé que :

- Le porteur ne s'est pas déplacé entre l'émission et la réception.
- Le porteur ne se déplace pas au cours de l'émission et la réception.

Ce qui n'est pas le cas. Nous savons, qu'en général, la plate forme se déplace de manière continue, cette simplification peut donc conduire à des erreurs de localisation de la cible. Outre les migrations en distance, des ambiguïtés ont lieu en distance et en azimuth. En azimuth, les lobes secondaires du diagramme d'antenne ne sont pas toujours négligeables en présence d'une cible très réfléchissante. En distance, la mesure de retard de l'écho est erronée si la variation de la distance de l'antenne à la scène n'est pas connue assez précisément.

De plus, les objets qui se déplacent au cours de l'acquisition, comme une voiture, ne peuvent pas être correctement localisés. En effet, la correction des migrations en distance et le positionnement sur l'axe azimuthal supposent un point fixe au sol. Dans le cas où leur position sur le terrain est connue, l'image SAR permet, par contre, d'estimer leur vitesse radiale.

## I.8. Echantillonnage de l'image radar :

Une image radar se forme par accumulation des signaux réfléchis par la surface terrestre au fur et à mesure de l'avancée de système. Les paragraphes précédents détaillent des équations continues, dans l'espace et dans le temps, du signal émis et reçu par le capteur. Or, une image est une série discrète de points dans l'espace. Par conséquent le signal reçu par le capteur radar est échantillonné à la fois en temps, sur la direction radial, et en distance, sur la direction azimuthale. Le but de ces échantillonnages est de donner une représentation non ambiguë du signal modulé. Par conséquent, sur la distance radiale, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à la valeur de modulation en fréquence du signal émis  $B_{chirp}$ . De même sur la direction azimuthale, la fréquence doit être supérieure à la largeur de la bande Doppler, en ne dépassant pas la résolution théorique.

Il est possible de définir les dimensions du pixel, en fonction de ces valeurs caractéristiques qui sont la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  et la fréquence de émission des impulsions (PRF). Ainsi, on obtient une valeur variable en distance  $\Delta\delta_r$ , en fonction de l'angle d'incidence, et une valeur fixe en azimuth  $\Delta\delta_a$  [7].

$$\begin{aligned}\Delta\delta_r &= \frac{c}{2f_e \sin(i)} \\ \Delta\delta_a &= \frac{V_{st}}{F_{PRF}}\end{aligned}\tag{I.20}$$

La relation d'échantillonnage en distance s'applique sur des zones planes où  $i$  correspond à l'angle d'incidence. Ainsi, la compression d'impulsion permet d'obtenir une meilleure résolution lorsqu'on passe de la portée proximale à la portée distale.

## **I.9. Caractéristiques de l'image radar :**

Les images déduites des signaux radar sont de trois types :

Une image d'amplitude, une image de phase et une image de polarisation.

### **I.9.1. Amplitude et phase :**

L'amplitude dépend du coefficient de rétrodiffusion de la zone éclairée dans les conditions d'observation. Elle est fonction de nombreuses caractéristiques géométriques (pente locale, humidité de sol, orientation des sillons des champs labourés...), mais également de caractéristiques aléatoires (interférences constructives et destructives). Quant à la phase du signal reçu, elle est la somme des quantités suivantes [7]:

$$\phi_{total} = \phi_{trajet} + \phi_{propre} + \phi_{bruit-global} \quad (I.21)$$

- $\phi_{trajet}$  désigne la phase du trajet: c'est le déphasage lié à la distance parcourue par l'onde.
- $\phi_{propre}$  est la somme de la phase de construction (elle ne correspond à aucun phénomène physique, mais sert à modéliser la phase globale de l'ensemble des échos issus d'un pixel de résolution) et la phase de rétrodiffusion (c'est le déphasage introduit au moment de l'interaction avec l'élément de surface).
- $\phi_{bruit-global}$  englobe la phase du bruit. Le bruit de phase introduit par l'instrumentation et les procédés d'acquisition (numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse, ...), la phase instrumentale (c'est celle produite par le système électronique d'émission et d'acquisition (temps de réponse des amplificateurs et autres dispositifs)) et aussi la phase atmosphérique (c'est un second déphasage de trajet produit par des conditions atmosphériques particulières).

On comprend aisément que l'information de phase n'est pas directement exploitable.

## **I.10. Principe du speckle :**

L'onde radar est une onde cohérente. Une surface naturelle pouvant être physiquement considérée comme un ensemble de  $N$  diffuseurs élémentaires, l'onde rétrodiffusée est donc la

somme des ondes élémentaires cohérentes diffusées par chaque diffuseur [2]. Dans le plan complexe, le champ total peut s'écrire comme l'addition des  $N$  vecteurs représentant les  $N$  contributions élémentaires (figure I.13) [36] :

$$z = i + jq = Ae^{j\varphi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N a_k e^{j\varphi_k} \quad (\text{I.22})$$

Où  $i$  et  $q$  sont respectivement les parties réelle et imaginaire de  $z$ .  $a_k$  et  $\varphi_k$  sont l'amplitude et la phase de la contribution du diffuseur  $k$ .  $A$  et  $\varphi$  sont l'amplitude et la phase du champ résultant. Il en résulte des phénomènes d'interférences qui donnent une allure caractéristique au signal reçu : c'est le chatoiement (speckle), qui perturbe l'estimation du coefficient de rétrodiffusion de la surface observée.

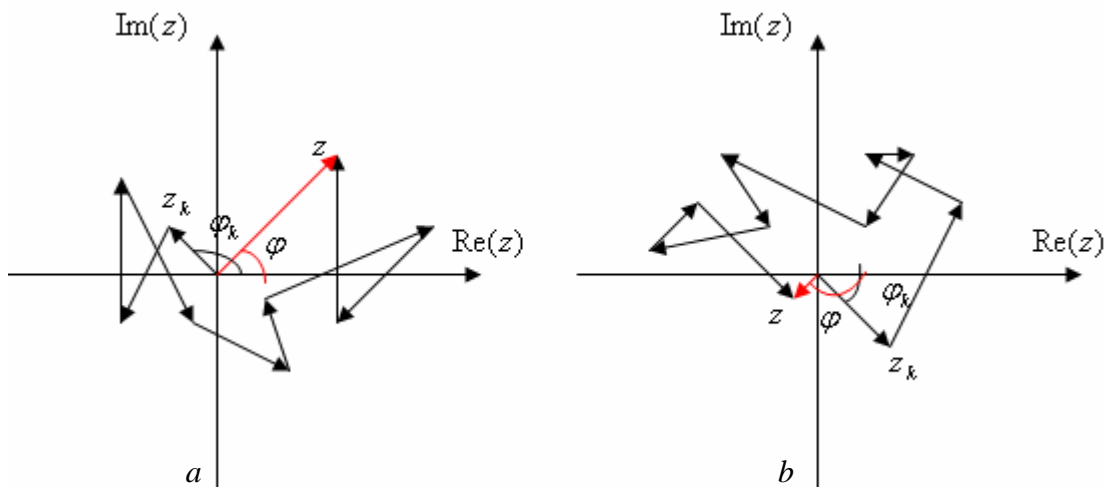


Figure I.13: construction de la réponse d'amplitude et de phase d'une cellule de résolution : agencements a) constructif et b) destructif des diffuseurs.

On suppose que :

- le nombre  $N$  de diffuseurs élémentaires par cellule de résolution est suffisamment grand (la résolution spatiale est bien plus grande que la longueur d'onde et il y a un grand nombre d'objets dans la cellule de résolution);
- l'amplitude et la phase du diffuseur  $k$  sont indépendantes de celles des autres diffuseurs (les interactions entre diffuseurs sont négligées) ;
- pour chaque diffuseur, l'amplitude et la phase sont indépendantes entre elles (le milieu diffusant a une structure aléatoire) ;

- les phases  $\varphi_k$  sont uniformément distribuées entre  $[-\pi, \pi]$  (la surface est considérée comme rugueuse par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$ ).

Ces hypothèses sont vérifiées pour des surfaces homogènes, on parle alors de speckle pleinement développé. Dans ce cas,  $i$  et  $q$  sont les sommes de  $N$  variables aléatoires indépendantes et sont distribuées selon une gaussienne de moyenne nulle et d'écart type  $s$  [36].

L'intensité, proportionnelle à la puissance rétrodiffusée, est donnée par  $I = A^2 = i^2 + q^2$  et suit une loi exponentielle de moyenne  $\langle I \rangle = 2s^2$  et de variance  $Var(I) = \langle I \rangle^2 = (2s^2)^2$ . Dans le cas d'un détecteur quadratique, la sortie du récepteur est directement proportionnelle à l'intensité de l'onde reçue. On montre, alors, que la variance du signal reçu est réduite d'un facteur  $M$  lorsqu'on moyenne  $M$  échantillons indépendants, ou vues, de la cible [36]:

$$Var(i) = \frac{\langle I \rangle^2}{M} \quad (I.23)$$

Les diffusiomètres ont pour but de mesurer avec la meilleure précision possible le  $\sigma_0$  des surfaces naturelles. Leur principe est ainsi basé sur la somme incohérente d'un grand nombre de vues prélevées spatialement au cours du déplacement du satellite, ce qui conduit à la réduction du speckle au détriment de la résolution spatiale.

A l'inverse, les radars SAR ont pour but d'imager les surfaces terrestres avec une bonne résolution spatiale. Ceci est réalisé à partir de la somme cohérente des réponses d'un diffuseur, au prix d'un bruit radiométrique élevé.

## **I.11. Étude des déformations géométriques des images radar :**

Cette partie est particulièrement consacrée à la géométrie des images radar, dont l'interprétation visuelle est très souvent difficile. Ceci nous conduira directement à définir les divers types de distorsions géométriques. Ces distorsions introduisent des limitations au niveau de la localisation spatiale et de la réponse radiométrique d'une cible de résolution [22, 17].

### **I.11.1. Déformations dues à la visée latérale :**

Le radar est un instrument à visée oblique, le faisceau radar illumine latéralement la surface à angle droit par rapport au déplacement de la plate forme. En plus c'est un outil de télémétrie, il mesure le temps entre l'émission de l'impulsion et la réception du signal rétrodiffusé par la cible [3]. Cette mesure est par conséquent réalisée dans le plan de l'onde, et la résolution radiale décroît de la portée proximale à la portée distale. La géométrie radar dans le plan image correspond à une échelle de temps dans le plan d'émission du faisceau radar. Cela

nous donne des cibles comprimées dans la portée proximale par rapport à celles de portée distale [21, 16, 11, 17] (figure 1.14)

À l'aide de fonctions trigonométriques, la distance au sol peut être calculée à partir de la distance oblique et de l'altitude de la plate-forme [9, 12]. La figure I.14 nous montre une image radar en distance oblique ( $a$ ), où les champs et les routes de la portée proximale (du côté gauche de l'image, encerclée en rouge) sont comprimés, et la même image convertie en distance au sol ( $b$ ) avec les structures dans leur forme géométrique correcte.

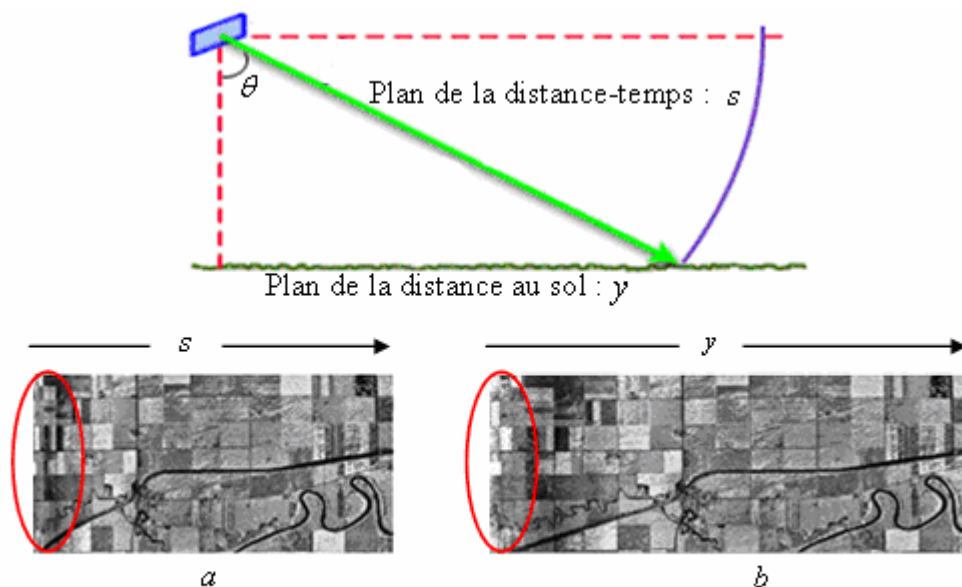


Figure I.14 : Les déformations dues à la visée latérale.  $a$  : Image dans le plan distance (SLC),  $b$  : Image dans le plan distance (projetée.)

### I.11.2. Distorsions géométrique dues au relief :

Sur les zones terrestres possédant du relief, les images obtenues à partir des capteurs SAR à visée latérale sont bien différentes de celles obtenues à partir des capteurs optiques. La morphologie des reliefs induit des distorsions géométriques bien particulières dans les images radar SAR. Généralement il existe trois types de distorsion géométrique [21]. Parmi celles-ci, nous verrons que deux d'entre elles induisent une perte d'information irréversible sur le relief réel. Les figures ci-dessous présentent des schémas simplifiés de ces trois types de distorsions [7, 17].

#### a) Compression :

La figure I.15 illustre la distorsion géométrique la plus courante, généralement représentée par des zones de compression dans l'image radar SAR. Elle est couramment appelée "foreshortening". Sur cette figure, nous avons indiqué trois éléments distincts A, B' et C du relief, tels que AB' est la pente du terrain orientée face au radar, avec angle inférieur à l'angle de visée  $\theta$  du capteur. Suite à l'illumination par le faisceau d'onde radar, leurs échos sont représentés par trois points distincts A, B et C dans le plan d'image. Il est clair que la distance AB dans le plan image est plus petite que la distance AB' du relief réel. La limite de cette distorsion est obtenue lorsque la pente AB' est perpendiculaire au faisceau d'onde électromagnétique. En effet, dans ce cas particulier, toute l'énergie rétrodiffusée par cette portion de terrain se retrouve complètement compressée dans un seul et pixel de l'image [32, 11, 17]. La figure I.15 montre une image radar d'un terrain montagneux abrupt avec un repliement important. Les pentes repliées apparaissent plus brillantes sur l'image.

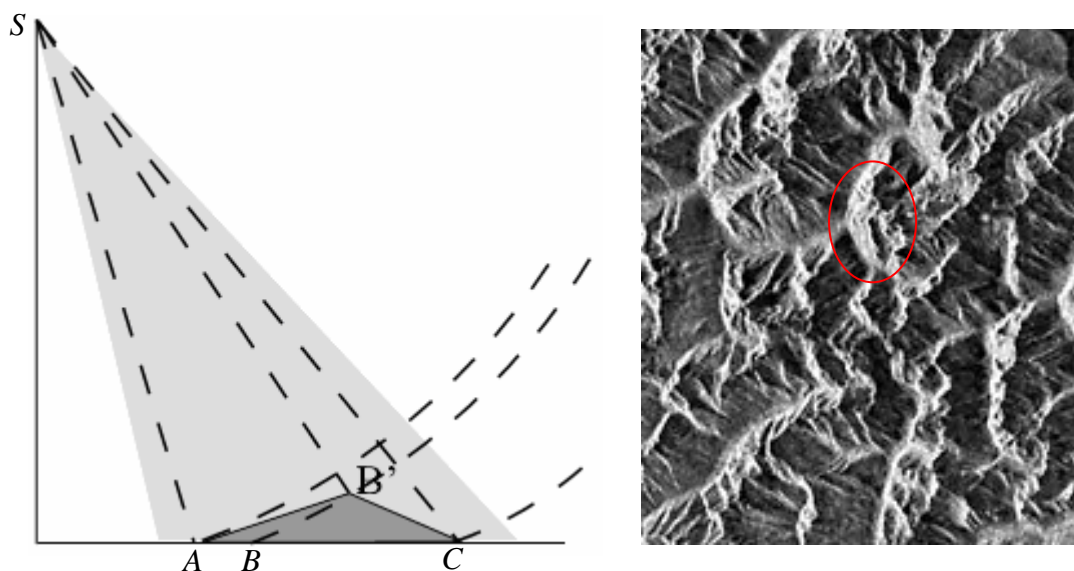


Figure I.15: Les distorsions géométriques dues à la morphologie du relief : compression

### b) Basculement :

Le basculement est illustré par la figure I.16. Cet autre type de distorsion géométrique est couramment appelé basculement (layover) [25]. Nous venons de voir son cas limite précédemment, mais expliquons son principe général. Sur cette la figure I.16, on remarque que la pente AB' orientée face au radar est supérieur à l'angle de visée du faisceau d'onde. L'illumination de cette portion de terrain produit une inversion dans l'image radar BA, mais également la superposition de signaux rétrodiffusés par la portion de terrain précédant la pente AB', et par la portion de terrain B'A' dont la pente est orientée face opposée au radar. Dans cette portion de l'image radar, il est impossible de distinguer les échos provenant de ces trois portions

du terrain. Cette perte d'information du relief réel est malheureusement irrémédiable [32, 11, 17].

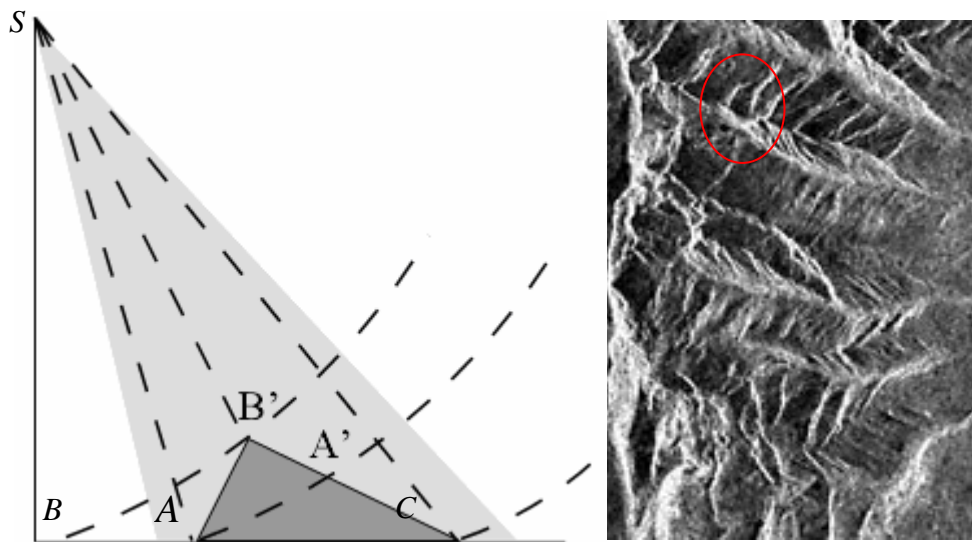
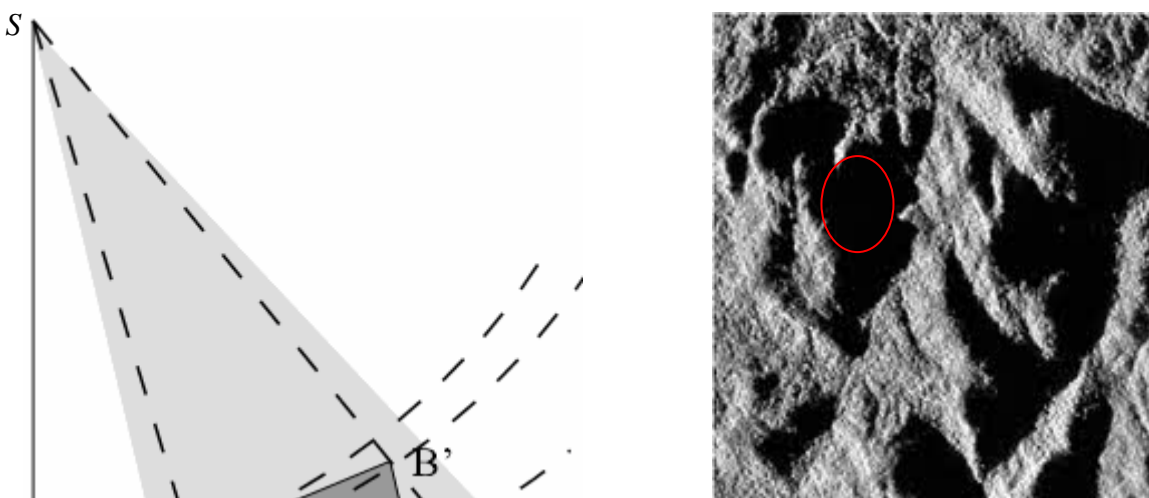


Figure I.16: Les distorsions géométriques dues à la morphologie du relief : basculement

**c) Ombre :**

La dernière distorsion géométrique, que l'on peut rencontrer sur les images radar, est le phénomène d'ombre, plus couramment appelé "shadowing" [25]. Ce phénomène est représenté par la figure 1.17, où l'on peut remarquer qu'une portion du terrain B'C, orientée face opposé au radar, n'est pas illuminée par le faisceau radar. Ceci se produit généralement lorsque la déclivité (pente) de B'C est supérieur, en valeur absolue, à l'angle complémentaire de visée du radar ( $\theta - 90^\circ$ ). Ce phénomène présente donc une perte d'information irrémédiable qui touche non seulement la portion B'C, mais également la portion du terrain CD. Les zones noires dans l'image sont ombragées et ne contiennent aucune information [32, 11, 17].



### I.11.3. Les migrations :

La 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 celle-ci est étalée en distance. Ce phénomène est appelé migration. Il y a deux types à savoir [7] :

#### a) Les migrations linéaires :

Dans certains cas, on peut observer une migration linéaire [7, 18]:

- L'antenne ne pointe pas tout à fait dans la direction perpendiculaire à la trajectoire de la plate forme.
- Le porteur ne se déplace pas tout à fait à distance constante au sol (orbite de satellite excentrée, imprécision de trajectoire de porteur). Cette variation en distance est généralement approchée par une migration linéaire sur l'image.
- La terre tourne durant l'acquisition de l'image. Le vecteur de la vitesse relative du porteur par rapport au sol, n'est plus perpendiculaire à la direction visée par l'antenne. Ceci est donc équivalent à un dépointage de celle-ci.

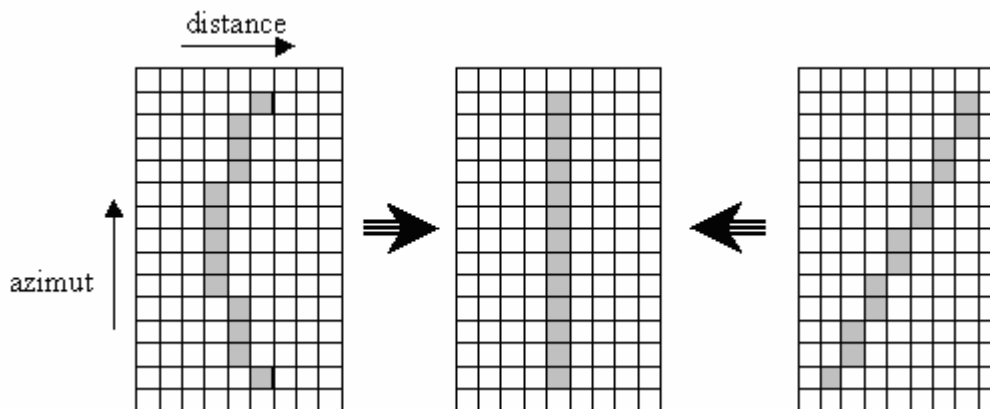


Figure I.18: Migrations parabolique (à gauche) et linéaire (à droite).

Les migrations linéaires peuvent donc toujours être assimilée à une mauvaise orientation de l'antenne, ce que l'on caractérise par un angle de dépointage avant ou arrière.

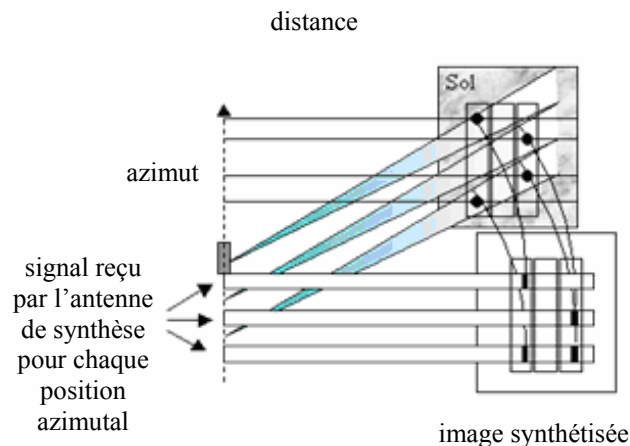


Figure I.19: Distorsion de l'image due au dépointage avant.

La figure I.19 montre que des points qui au sol, ne sont pas alignés (dans la direction perpendiculaire à la trajectoire), sont assignés à la même position azimutale dans l'image radar.

### b) Les migrations paraboliques :

D'après la figure I.20, la distance entre la cible et le vecteur varie le long de trajet. Ce phénomène a bien entendu des répercussions sur l'image. Il est directement proportionnel à l'ouverture du faisceau radar [2, 7, 12].

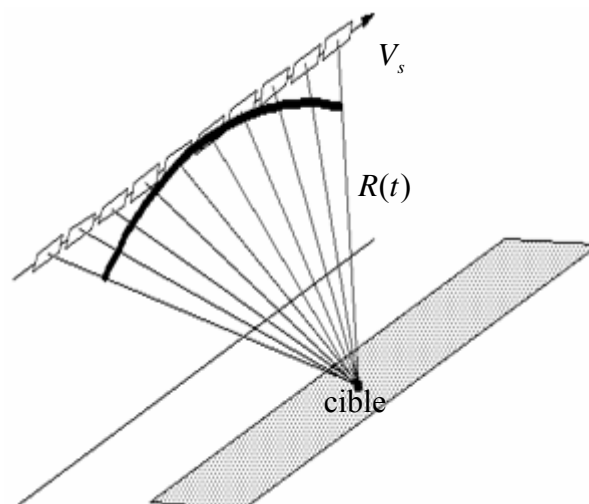


Figure I.20 : Antenne virtuelle équivalente.

La variation de la distance cible-radar au cours du déplacement introduit une variation de la durée du parcours aller-retour de l'onde. Cette variation de temps se retrouve sur l'image, puisque la durée  $t$  du trajet définit la position de l'écho reçu dans la direction des distances. Ainsi, l'écho brut décrit une parabole dans la direction des distances : c'est ce qu'on appelle les

migrations paraboliques (figure I.20). Afin de focaliser la réponse de la cible correctement sur l'image synthétisée, ces migrations doivent être corrigées en ramenant tous les échantillons sur la même ligne distance. En remarquant que la durée du trajet varie en fonction de la position relative du radar par rapport à la cible  $\Delta x$  (figure I.11), il est alors possible d'exprimer cette variation de durée en fonction de la fréquence Doppler réduite [2, 7]:

$$\begin{cases} f_r = \frac{2V_s}{\lambda R_0 F_{prf}} \Delta x \\ t = \frac{2R_0}{c} + \frac{\Delta x^2}{R_0} \end{cases} \Rightarrow t = \frac{2R_0}{c} + \frac{\lambda^2 R_0 F_{prf}^2}{4V_s^2 c} f_r^2 \quad (\text{I.24.a})$$

C'est-à-dire

$$t = \frac{2R_0}{c} + \frac{\lambda}{2c} N_a f_r^2 \quad (\text{I.24.b})$$

$N_a$  est le taux de compression en azimut et  $f_r$  est la fréquence réduite en azimut, qui correspond à la fréquence Doppler normalisée par rapport à la fréquence d'échantillonnage dans cette direction  $F_{prf}$ . Sur l'image brute, le signal est échantillonné en distance à une fréquence  $f_e$ .

Alors, la variation en pixel autour de sa position de référence  $n(n = \frac{2R_0}{c} f_e)$  est donnée par :

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2c} f_e N_a f_r^2 \quad (\text{I.25})$$

Il faut donc appliquer au signal un décalage spatial suivant la direction des distances en fonction de la fréquence Doppler réduite en azimut. Ce traitement se fait dans le domaine fréquentiel. En effet, d'après les propriétés de la transformée de Fourier, un décalage dans le domaine temporel équivaut à une multiplication par une rampe de phase dans le domaine fréquentiel.

Soit  $S(k, n)$  le signal à corriger, où  $k$  et  $n$  sont les positions en pixels dans les directions des azimuts et des distances. Sa transformée de Fourier  $2D(S(f_a, f_d))$ , varie en fonction des fréquences normalisées en azimut ( $f_a$ ) et en distance ( $f_d$ ). Alors, le signal corrigé a pour réponse fréquentielle [2]:

$$S_{corr}(f_a, f_d) = S(f_a, f_d) \cdot \exp(-j\pi \frac{\lambda f_e}{c} N_a f_a^2 f_d) \quad (\text{I.26})$$

Dans le cas du capteur ERS, qui émet une onde de longueur d'onde  $\lambda = 5.66\text{cm}$ , il échantillonne le signal reçu à une fréquence  $f_e = 18.96\text{MHz}$  et admet pour taux de compression en azimut  $N_a = 1250$ , on a :

$$\frac{\lambda f_e}{2c} N_a \approx 2.2 \quad (\text{I.27})$$

Ainsi, pour  $|f_r| = 0.5$ , la migration est égale à 0.55 pixel.

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

$$N_d = \frac{\tau}{B_{chirp}} f_e^2 \quad (\text{I.28})$$

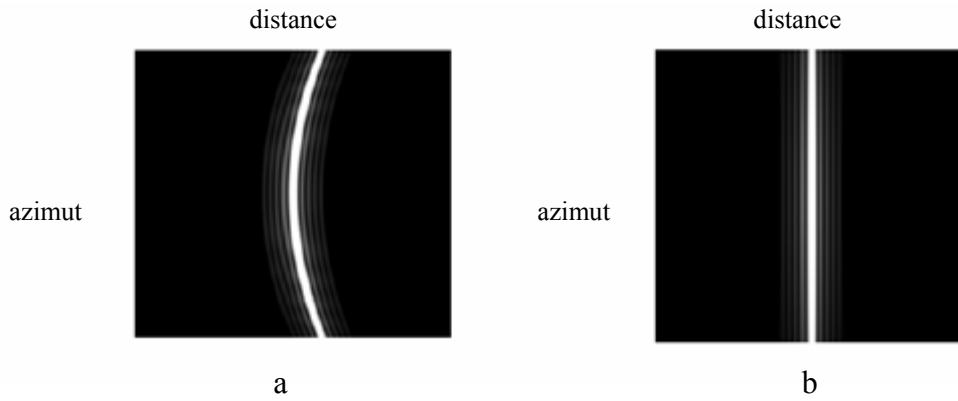


Figure I.21: Signal brut d'une cible isotrope : a- après la compression en distance, b- après correction des migrations.

#### I.11.4. Les déformations dues aux capteurs :

- a) La stabilité du capteur est un facteur très important pour la précision géométrique de l'image [35]. Une variation des temps dans la propagation des impulsions émises et reçues par le radar dépend essentiellement de la stabilité de l'oscillateur local. En effet, la fréquence PRF est liée à la résolution azimutale du pixel qui est donnée par la relation de l'équation I.20.

Où l'amplitude de la vitesse  $V_{st}$  (vitesse relative d'une cible) est donnée par [17] :

$$V_{st} = \left| \frac{R_t}{R_s} (V_s - V_t) \right| \quad (\text{I.29})$$

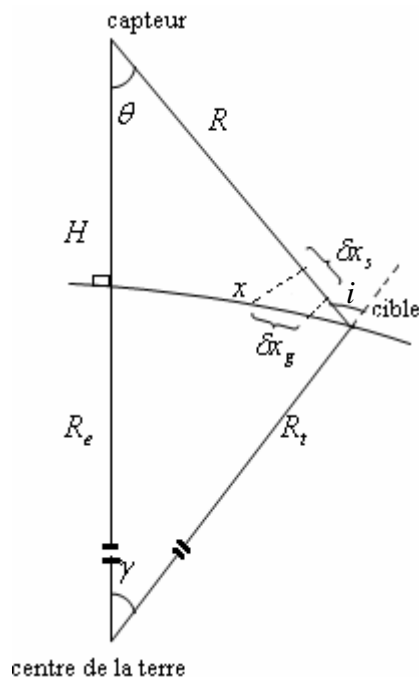
Où  $R_s$  et  $R_t$  sont les vecteurs position du capteur et de la cible.  $V_s$  et  $V_t$  sont les vecteurs vitesse du capteur et de la cible, respectivement. Donc une erreur au niveau de l'oscillateur engendrera une erreur sur la fréquence PRF qui résultera en une erreur d'échelle le long de la trace.

b) Le deuxième paramètre qui affecte directement la géométrie des données est le retard électronique du signal lors de l'émission et de la réception de l'impulsion. Ce retard  $\tau_e$  doit être déduit du retard total mesuré, ce qui nous donne [35, 17] :

$$R = \frac{c}{2}(\tau_r - \tau_e) \quad (\text{I.30})$$

Dans cette formule,  $\tau_r$  représente le retard total du moment où le signal est envoyé pour l'excitation du générateur d'impulsions jusqu'au moment où l'écho est numérisé par le convertisseur analogique-numérique. Une erreur dans l'estimation de ce temps provoquera une erreur dans l'estimation de l'angle d'incidence. En effet, de la figure I.22, nous pouvons écrire [22, 23]:

$$i = \arccos \left( \frac{\|R_s\|^2 - \|R_t\|^2 - \|R_s - R_t\|^2}{2\|R_t\|\|R_s - R_t\|} \right) \quad (\text{I.31})$$



Où  $i$  est l'angle d'incidence,  $\theta$  l'angle de vue et  $R_e = R_0 + H$ .

Figure I.22. Relation entre l'angle de vue  $\theta$  et l'angle d'incidence  $i$ .

Une erreur sur la valeur  $R$  engendrera une erreur d'échelle transversale dans l'image radar puisque la résolution transversale du pixel donnée par l'équation I.20, est en fonction de l'angle d'incidence.

- c) Un troisième type d'erreur, qui peut être classé plus justement comme une erreur due à la plate-forme, est la dérive de l'horloge du satellite. Un décalage entre l'horloge du satellite et celle du fichier des éphémérides envoyé par le satellite engendrera une erreur de localisation de la cible. En effet, à une dérive due à l'horloge du satellite résultera une erreur dans l'estimation de la longitude de la cible suivant l'équation [35] :

$$\Delta\varphi = \omega_e s_d \cos(lat) \quad (I.33)$$

Où  $\omega_e$  est la vitesse angulaire de la terre,  $s_d$  la dérive de l'horloge et  $lat$  est la latitude géographique de la cible.

Il y a aussi les distorsions dues à la plate forme et qui sont résumées dans les points suivants [35]:

- Erreur induite dans le traitement du signal radar (la fréquence doppler) impliquera un déplacement de la cible en azimuth.
- L'atmosphère engendre aussi un retard de propagation et qui implique aussi une erreur en distance.
- Erreurs d'éphémérides de la plate forme :
  1. erreur de position du capteur le long de la trace qui implique une erreur de position en azimuth.
  2. erreur de position dans la direction perpendiculaire à la trace, elle implique une erreur en distance.
  3. erreur en altitude, elle implique une erreur en distance et en azimuth.
  4. erreur de vitesse, elle implique une erreur en azimuth.

### **I.13. Conclusion sur la synthèse des images radar :**

Dans les paragraphes précédents, les différentes étapes de synthèse des images radar ont été décrites. Ainsi, pour améliorer la résolution de ces images et bien focaliser la réponse des cibles ponctuelles isotropes, le signal brut passe à travers trois filtres, dont les fonctions sont les suivantes [2] :

- compression d'impulsion en distance ( $Hc$ )
- correction des migrations ( $Hmig$ )

- synthèse d'ouverture (compression en azimut) ( $H_{az}$ )

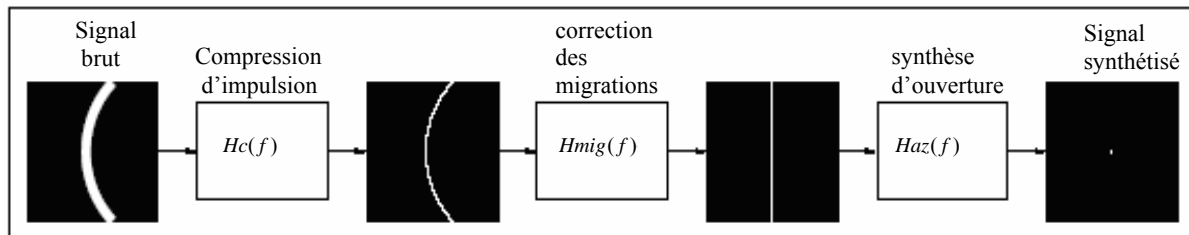


Figure I .23: la synthèse des images radar

Ces filtres ont pour réponse fréquentielle [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_c(f_a, f_d) = \frac{1}{\sqrt{K}} \exp(-j\frac{\pi}{4} + j\pi \frac{(f_d - f)^2}{K}) \quad \text{pour } |f_d - f| < \frac{B_{chirp}}{2} \\ H_{mig}(f_a, f_d) = \exp(-j\pi \frac{\lambda f_e}{c} N_a f_a^2 f_d) \\ H_{az}(f_a, f_d) = \exp(j\pi N_a f_a^2) \end{array} \right. \quad (I.34)$$

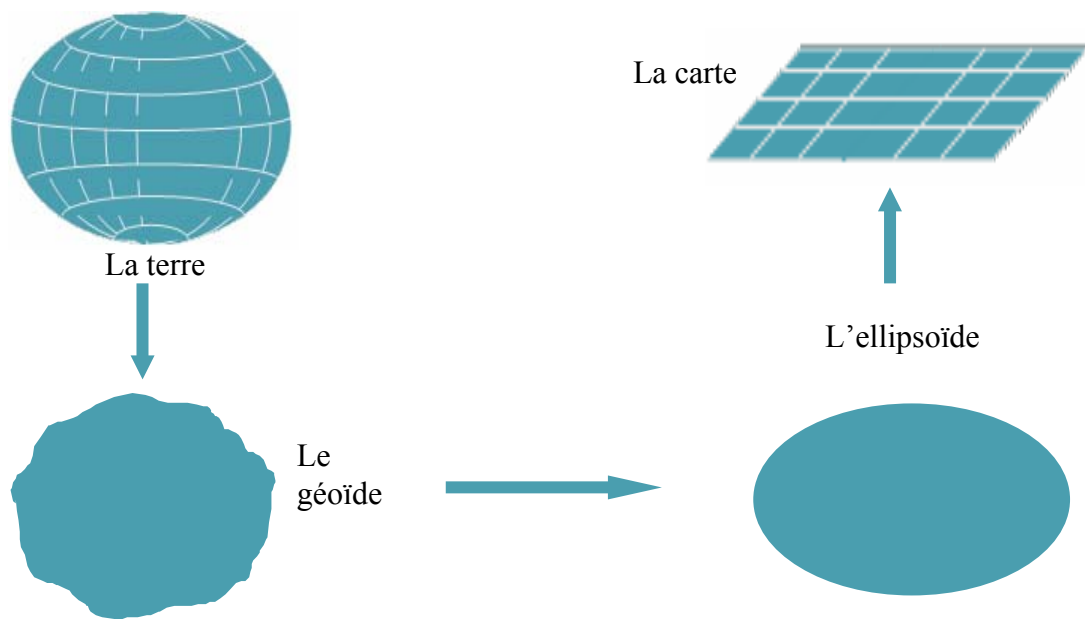
La fréquence  $f$  est La fréquence normalisée en fonction de la bande passante  $B_{chirp}$ .

Dans notre travail nous intéressons à la géométrie radar dans son schéma global. Afin de modéliser les distorsions géométriques, la représentation de notre image dans un système géodésique et le passage entre les différents systèmes de coordonnées, nous présentons dans le chapitre qui suit les systèmes de projections et les transformations entre les systèmes géodésiques.

## **Chapitre II :**

**Systemes de projections et transformation  
entre les systemes géodésiques.**

Le développement des échanges de données sous forme numérique et l'intégration sur le même site de données d'origines diverses mettent en contact direct les utilisateurs avec les problèmes de référentiels géodésiques et de systèmes de projection. En effet, pour que les croisements et les comparaisons de telles données aient un sens, il faut apprécier l'incidence bien réelle de ces paramètres. On peut définir un système de projection comme un ensemble de paramètres correspondant à différents aspects de la représentation de la surface de la Terre (figure II.1).



FigureII.1 : De la surface terrestre à la carte

### II.1. Surface topographique :

Elle joue le rôle d'interface entre la partie solide et la partie liquide ou gazeuse de la Terre. C'est elle que nous connaissons le mieux, d'un point de vue sensoriel et physique, elle est l'objet de nombreuses sciences et techniques.

### II.2. Le géoïde :

Il se définit comme la surface équipotentielle du champ de pesanteur. L'accélération de pesanteur ( $g$ ) lui est donc normale en tout point. Une bonne réalisation physique de cette équipotentielle est la surface moyenne des mers et océans. Mais sous les continents, l'accès à cette surface ne peut être qu'indirect. On retiendra donc la réalité physique indéniable de cette surface tout en gardant à l'esprit les difficultés que nécessite sa détermination [13].

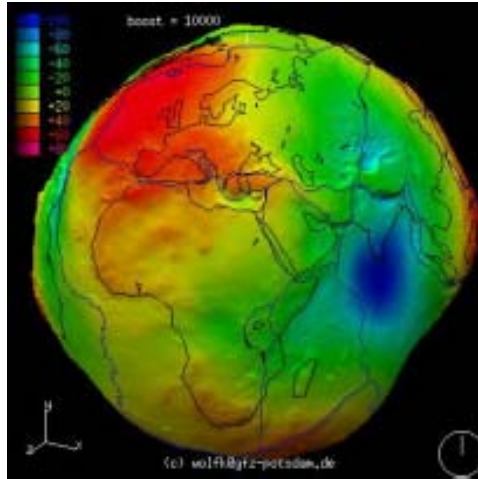


Figure II.2 : Forme et hauteur du modèle de Géoïde GRIM5.

La figure II.2 nous montre un exemple de Géoïde GRIM5.

### II.3. L'ellipsoïde :

L'ellipsoïde est un modèle mathématique défini pour faciliter les calculs et pour qu'il soit le plus près possible du géoïde, il peut être local ou global, selon le champ d'application souhaité du système géodésique auquel il est associé (couverture mondiale ou d'un territoire seulement). L'équation de l'ellipsoïde de référence utilisée localement peut s'écrire [13], [20], [23, 8]:

$$\frac{X^2 + Y^2}{(a + N')^2} + \frac{Z^2}{(b + N')^2} = 1 \quad (\text{II.1})$$

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

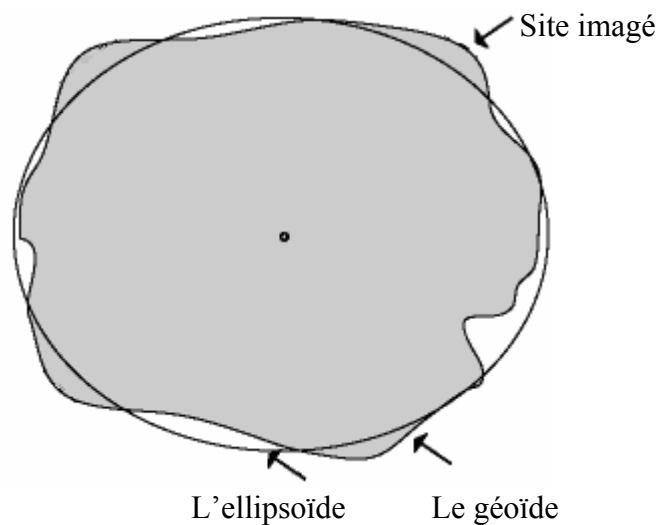


Figure II.3 : Le géoïde et les différentes surfaces utilisées.

L'ellipsoïde est défini par son demi grand axe et son demi petit axe, par sa première et deuxième excentricité respectivement.  $(e^2 = (\frac{a^2 - b^2}{a^2}))$  et  $(e'^2 = (\frac{a^2 - b^2}{b^2}))$ . On définit, aussi, son aplatissement par  $f'$  ( $f' = (\frac{a-b}{b})$ ).

#### II.4. Le système géodésique :

On définit un système géodésique (ou Datum géodésique) comme un repère affine possédant les caractéristiques suivantes [13]:

- le centre  $O$  est proche du centre de masse de la Terre.
- l'axe  $OZ$  est proche de l'axe de rotation terrestre.
- le plan  $OXZ$  est proche du plan méridien origine.

Les coordonnées géodésiques du point  $M$  (le point  $M$  se situe sur la surface topographique de la terre) ne sont pas des valeurs objectives mais bien dépendantes d'un modèle théorique. Un point de la croûte terrestre est considéré fixe par rapport au système géodésique, malgré les petits déplacements qu'il peut subir (marée terrestre, surcharge océanique, mouvements tectoniques). Ainsi, il apparaît la nécessité de disposer d'une surface de référence (l'ellipsoïde).

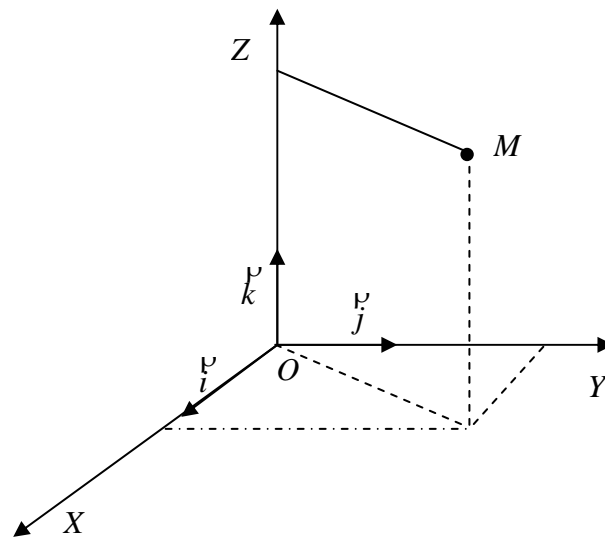


Figure II.4 : coordonnées cartésiennes.

Généralement il est défini par un certain nombre de paramètres, établi à partir de points de référence le plus souvent mesurés sur le terrain. Le référentiel géodésique est composé : (figure II.5) [13]:

- d'un ellipsoïde, locale ou globale,
- de la position relative et l'orientation de l'ellipsoïde par rapport au centre de la Terre.

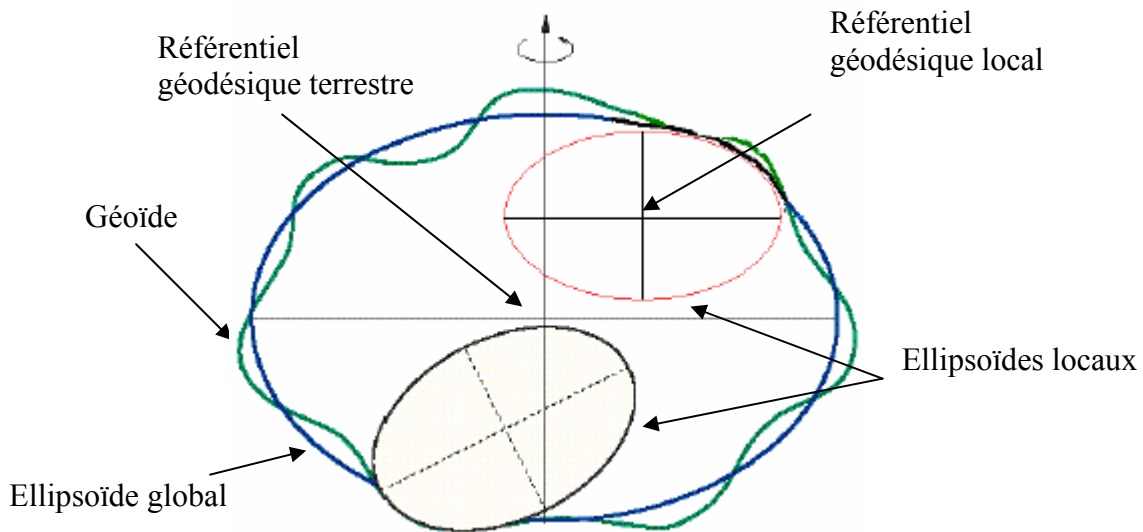


Figure II.5 : Représentation des référentiels géodésiques.

Il y a plusieurs référentiels géodésiques (tableau II.1). Le but d'un référentiel géodésique est d'adapter au mieux l'ellipsoïde à la surface terrestre réelle localement (Figure II.5). Il existe des référentiels géodésiques adaptés aux échelles globale, continentale et nationale.

| Système géodésique                 | Ellipsoïde (sphéroïde) | Région d'utilisation |
|------------------------------------|------------------------|----------------------|
| World Geodetic System 1984 (WGS84) | WGS84                  | International        |
| NAD83                              | GRS80                  | Nord Américain       |
| NAD27                              | Clarck 1899            | Nord Américain       |
| WGS84                              | GRS 1980               | Tout le globe        |
| Nord sahara                        | Clarke 1880            | Algérie              |
| European 1950 (ED50)               | International 1924     | France, Tunisie      |

Tableau.II.1 : Systèmes géodésiques et leurs ellipsoïdes

## II.5. Systèmes de coordonnées :

Plusieurs surfaces sont accessibles pour déterminer les coordonnées d'un point, qui peuvent être exprimées de façon différentes selon le type d'application. Le lien entre le type de coordonnées et la surface de référence est primordial. Connaître ces deux éléments constitue une obligation pour exploiter la localisation des points. Alors toute projection est effectuée sur un système de coordonnées utilisé pour la localisation. Les systèmes de coordonnées les plus utilisés sont les suivants.

### II.5.1. Coordonnées cartésiennes ou coordonnées tri-rectangulaires :

Un point  $M$  à la surface de la Terre peut être repéré par des coordonnées dans un système géodésique, repère géocentrique orthonormé,  $(o, \overset{P}{i}, \overset{P}{j}, \overset{P}{k})$  de coordonnées  $(X, Y, Z)$  où  $O$  est proche du centre de la terre,  $\overset{P}{i}, \overset{P}{j}$  dans le plan équatorial et  $\overset{P}{k}$  dans la direction du nord géographique, voir la figure II.4 [13].

### II.5.2. Coordonnées géographiques :

Coordonnées dans un système géodésique, latitude ( $lat$ ), longitude ( $lon$ ) et hauteur ( $h$ ). Si, de plus, on choisit un ellipsoïde comme surface de référence terrestre (on parle d'ellipsoïde géodésique) et un méridien origine (origine de la mesure des longitudes), on peut définir les coordonnées géographiques  $(lon, lat, h)$  d'un point  $M$  quelconque de l'espace. Les coordonnées  $(lon, lat, h)$  sont tridimensionnelles dans la mesure ou elles permettent la description d'un point quelconque de l'espace [13]. Mais les coordonnées  $(lon, lat)$ , elles, sont bidimensionnelles ou planimétriques; elles constituent un paramétrage d'une surface, l'ellipsoïde en l'occurrence.

- la longitude ( $lon$ ), qui est l'angle entre le plan du méridien de référence et le plan du méridien du point  $M$ .
- la latitude ( $lat$ ), qui est l'angle orienté, dans le plan du méridien du point, entre l'équateur et la normale à l'ellipsoïde.
- l'altitude  $h$  qui est la distance à l'ellipsoïde.

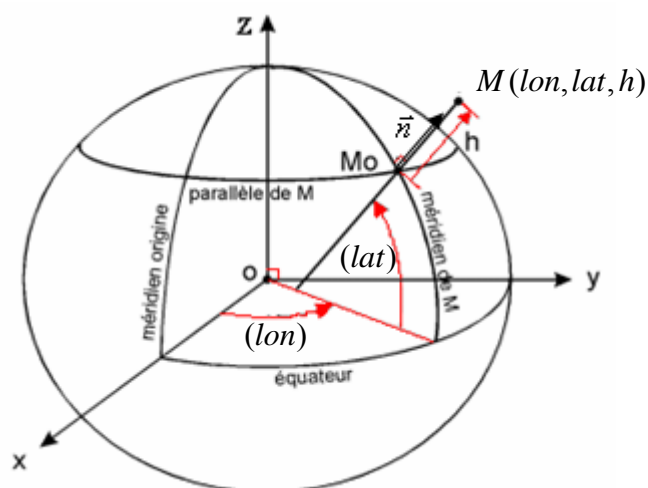


Figure II.6 : Représentation des coordonnées géographiques d'un point.

On définit aussi une autre altitude  $H'$ , c'est l'altitude au-dessus du géoïde [26] (Figure II.7),  $h = H' + N'$  où  $N'$  est l'écart entre l'ellipsoïde et le géoïde (hauteur géoïdale),

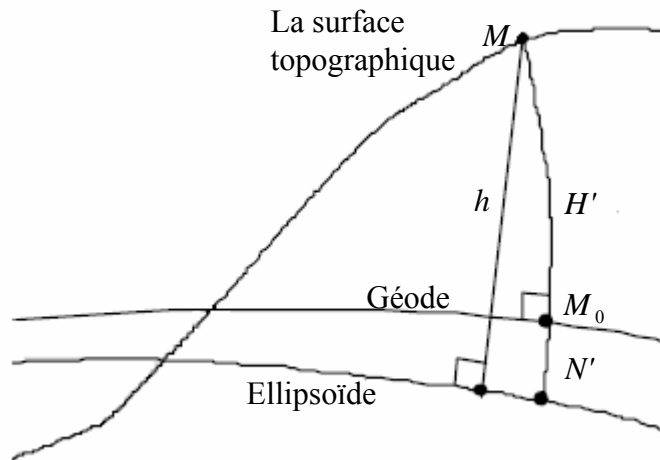


Figure II.7 : Représentation de l'altitude d'un point.

La distance entre le géoïde et l'ellipsoïde du système de référence utilisé peut être connue dans certains cas en consultant les rapports décrivant l'établissement des systèmes géodésiques locaux. Dans les zones où les résultats de tels travaux ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser un modèle de géoïde mondial. Il en existe plusieurs modèles, nous citons les modèles EGM96, GRIM5, Earth Gravity Model 1996 (EGM96) qui est disponible gratuitement sur Internet (<http://www.nima.mil/GandG/wgs-84/egm96.html>) et donne la hauteur du niveau moyen des mers sur l'ellipsoïde WGS-84.

### II.5.3. Coordonnées planimétriques (cartographiques) :

Si en plus une représentation plane de l'ellipsoïde a été choisie, alors on peut définir la position de  $M$  par ses coordonnées cartésiennes dans un plan de projection, coordonnées dites planes ou en projection et notées conventionnellement  $(E, N)$

Les coordonnées  $(E, N)$  sont bidimensionnelles, mais, en y associant la hauteur  $h$ ,  $(E, N, h)$  on a un jeu de coordonnées tridimensionnelles. Enfin, les coordonnées, pour la localisation d'un point spatial, sont données dans un référentiel géodésique suivant un des systèmes de coordonnées cités ci-dessus. Comme les sources des données sont très variées (systèmes de coordonnées différents, projections différentes), nous avons très souvent besoin d'effectuer soit un changement de système géodésique soit une conversion d'un système de coordonnées à un autre.

## II.6. Passage entre deux systèmes géodésiques et le changement de système de coordonnées dans le même système géodésique:

Un changement de système géodésique s'effectue le plus souvent au niveau des coordonnées cartésiennes géocentriques  $(X, Y, Z)$  [26]. Si nous disposons de coordonnées géographiques  $(lon, lat, h)$ , nous devons donc les transformer en coordonnées cartésiennes géocentriques, et si nous travaillons en projection, il nous faudra passer tout d'abord en coordonnées géographiques, puis en coordonnées cartésiennes géocentriques.

Le schéma II.8 résume toutes les transformations de coordonnées courantes en géodésie :

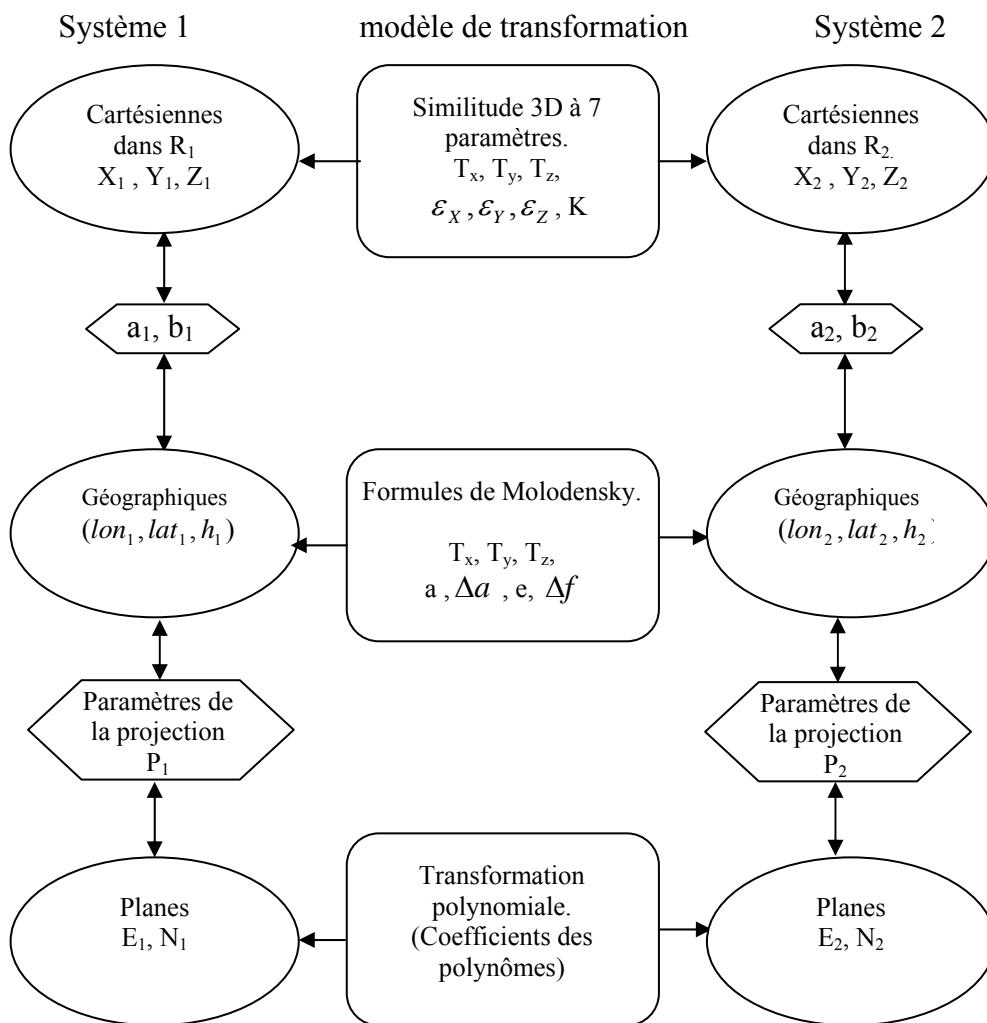


Figure II.8 : Modèle du processus de transformation entre les systèmes géodésiques

Dans ce qui suit, nous allons développer les modèles de transformation similitude, formules de Molodensky et la transformation polynomiale.

## II.6.1. Passage entre deux systèmes géodésiques :

### a) Similitude 3D (Bursa wolf) :

La modélisation d'un changement entre deux repères affins orthogonaux  $R_1$  et  $R_2$  se fait par les 7 paramètres suivants :

- Translation  $T = [T_x, T_y, T_z]$ ,
- Facteur d'échelle  $F$  tel que  $\|l_1^U\| = (1 + F)\|l_2^U\|$ ,
- Rotations  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  et  $\varepsilon_z$  autour du 1<sup>er</sup>, du 2<sup>ème</sup> et du 3<sup>ème</sup> axes respectivement.

Nous présentons, dans ce qui suit quelques modèles de translation. Soient  $(X_1, Y_1, Z_1)$  et  $(X_2, Y_2, Z_2)$  les coordonnées cartésiennes de point  $M$  dans respectivement  $R_1$  et  $R_2$  (figure II9).

On peut écrire:

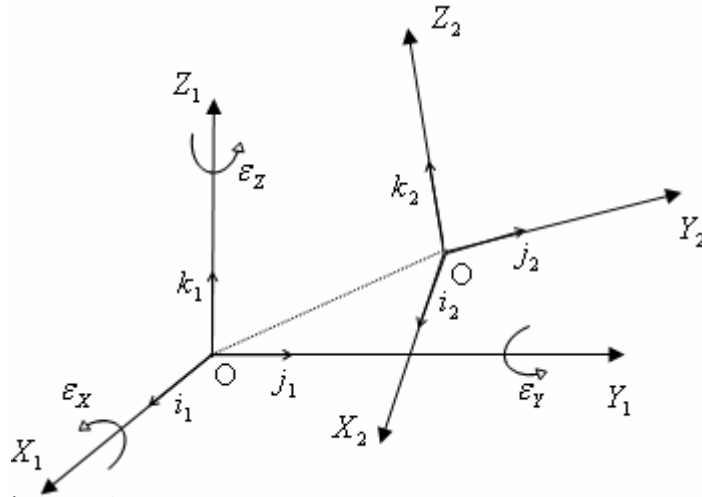


Figure II.9: Changement de système par la similitude spatiale

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + [M] \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Où } [M] = \begin{bmatrix} ((1+F)\cos\varepsilon_y \cos\varepsilon_x) & (\cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_z) & (-\sin\varepsilon_y) \\ \left( \begin{array}{l} -\cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_z + \\ \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \cos\varepsilon_z \end{array} \right) & \left( \begin{array}{l} (1+F)(\cos\varepsilon_x \cos\varepsilon_z + \\ \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \sin\varepsilon_z) \end{array} \right) & (\sin\varepsilon_x \cos\varepsilon_y) \\ \left( \begin{array}{l} \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_z + \\ \cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \cos\varepsilon_z \end{array} \right) & \left( \begin{array}{l} \sin\varepsilon_x \cos\varepsilon_z + \\ \cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \sin\varepsilon_z \end{array} \right) & ((1+F)\cos\varepsilon_x \cos\varepsilon_y) \end{bmatrix}$$

Le passage d'un système géodésique à un autre est donc défini par les sept paramètres  $T = (T_x, T_y, T_z, F, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$  d'une similitude.  $T$  est à priori inconnue; pratiquement, ses

inconnues sont généralement estimées par les moindres carrés à partir de  $n$  points connus ( $n = 3$ ) dans les deux systèmes.

### b) Méthode Molodensky

Les formules de Molodensky sont des développements limités dont l'ordre influe évidemment sur la précision finale. Le passage inverse nécessite l'application de formules différentes. Soient  $(lon_1, lat_1, h_1)$  les coordonnées géographiques d'un point  $M$  dans le référentiel  $R_1$  muni d'un ellipsoïde  $El_1(a_1, f'_1)$  caractérisé par  $a_1$  et  $f'_1$  et  $(lon_2, lat_2, h_2)$  les coordonnées géographiques du même point  $M$  dans le référentiel  $R_2$  muni d'un autre ellipsoïde  $El_2(a_2, f'_2)$  caractérisé par  $a_2$  et  $f'_2$ . Notons  $\Delta a = a_2 - a_1$  et  $\Delta f' = f'_2 - f'_1$ . Les formules pour passer du système  $R_1$  au système  $R_2$ , sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 \bullet lon_2 &= lon_1 + \frac{-T_x \sin(lon_1) + T_y \cos(lon_1)}{N_1 \cos \varphi_1} \\
 \bullet lat_2 &= lat_1 + \frac{-T_x \sin(lat_1) \cos(lon_1) - T_y \sin(lat_1) \sin(lon_1) + T_z \cos(lat_1) + (a\Delta f' + f' \Delta a) \sin(2lat_1)}{\rho_1} \quad (II.3) \\
 \bullet h_2 &= h_1 + T_x \cos(lat_1) \cos(lon_1) + T_y \cos(lat_1) \sin(lon_1) + T_z \sin(lat_1) + (a\Delta f' + f' \Delta a) \sin^2(lat_1) - \Delta a
 \end{aligned}$$

Où  $N_1 = \frac{a_1}{(1 - e^2 \sin^2(lat_1))^{1/2}}$  et  $\rho_1 = \frac{a_1(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2(lat_1))^{3/2}}$

### c) Transformations polynomiales :

Pour une zone d'application peu étendue, il est possible de déterminer directement des formules de passages entre des coordonnées planes issues de système géodésiques différents à partir de polynômes de degré  $n$ . Soient  $(E_1, N_1)$  les coordonnées planes d'un point  $M$  dans le référentiel  $R_1$  et  $(E_2, N_2)$  les coordonnées planes du même point  $M$  dans le référentiel  $R_2$ . L'interpolation polynomiale se fait par des polynômes dont il faut choisir le degré. Les formules sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 E_2 &= \sum_{i=1}^n A_i E_1^{i-1} \\
 N_2 &= \sum_{i=1}^n B_i N_1^{i-1}
 \end{aligned} \quad (II.4)$$

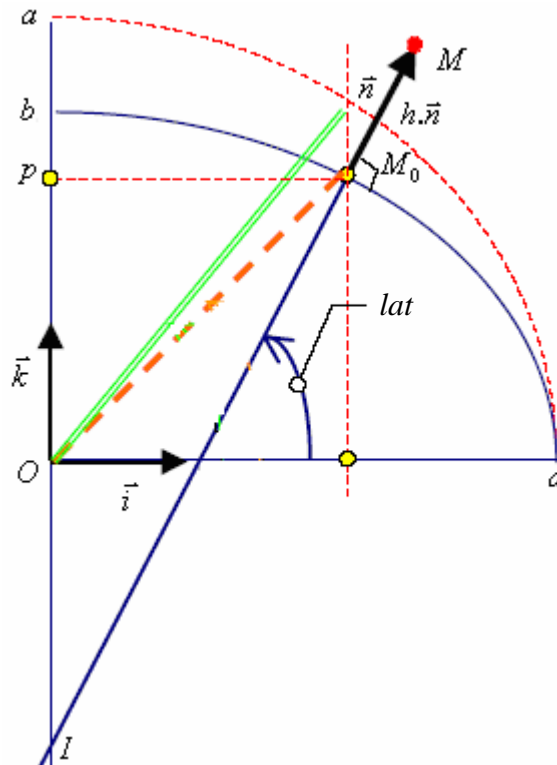
Très souvent, nous avons besoin de changer le système de coordonnées tout en restant dans le même système géodésique.

## II.6.2. Changement de système de coordonnées dans le même système géodésique

### a) Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées cartésiennes :

Soient  $M(X,Y,Z)$  un point quelconque de l'espace et  $M_0(X_0,Y_0,Z_0)$  sa projection normale sur l'ellipsoïde;  $M_0$  est donc définie de telle sorte que  $\overrightarrow{M_0M} = h\vec{n}$ . Où  $h$  est la hauteur de  $M$  au-dessus de l'ellipsoïde (figure II.10).

FigureII.10 : Représentation des coordonnées géographiques



FigureII.10 : Représentation des coordonnées géographiques

La formule de transformation des coordonnées géographiques  $(lon, lat, h)$  aux coordonnées cartésiennes géocentriques  $(X, Y, Z)$ , c'est à dire dans le repère  $R$  centré au centre de la terre [22, 1, 19] est donnée par l'équation II.5.

$$\begin{cases} X = (N + h) \cos(lon) \cos(lat) \\ Y = (N + h) \sin(lon) \cos(lat) \\ Z = [N(1 - e^2) + h] \sin(lat) \end{cases} \quad (II.5)$$

$$\text{Où } N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(lat)}}$$

## b) Passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées géographiques :

La transformation inverse, des coordonnées cartésiennes  $(X, Y, Z)$  aux coordonnées géographiques  $(lon, lat, h)$ , est effectuée par deux méthodes à savoir :

### 1. Méthode directe :

Les formules sont les suivantes :

On pose

$$f = 1 - \sqrt{1 - e^2}, \quad R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$\text{et } \mu = \arctan\left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left((1 - f) + \left(\frac{e^2 a}{R}\right)\right)\right]$$

Alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} lat = \arctan\left[\frac{Z(1 - f) + e^2 a \sin^3 \mu}{(1 - f)[\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 \mu]}\right] \\ lon = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ h = [\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos(lat)] + [Z \sin(lat)] - [a\sqrt{1 - e^2} \sin^2(lat)] \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

### 2. Méthode itérative :

Cette méthode est donnée par l'organigramme de la figure II.11 [26].

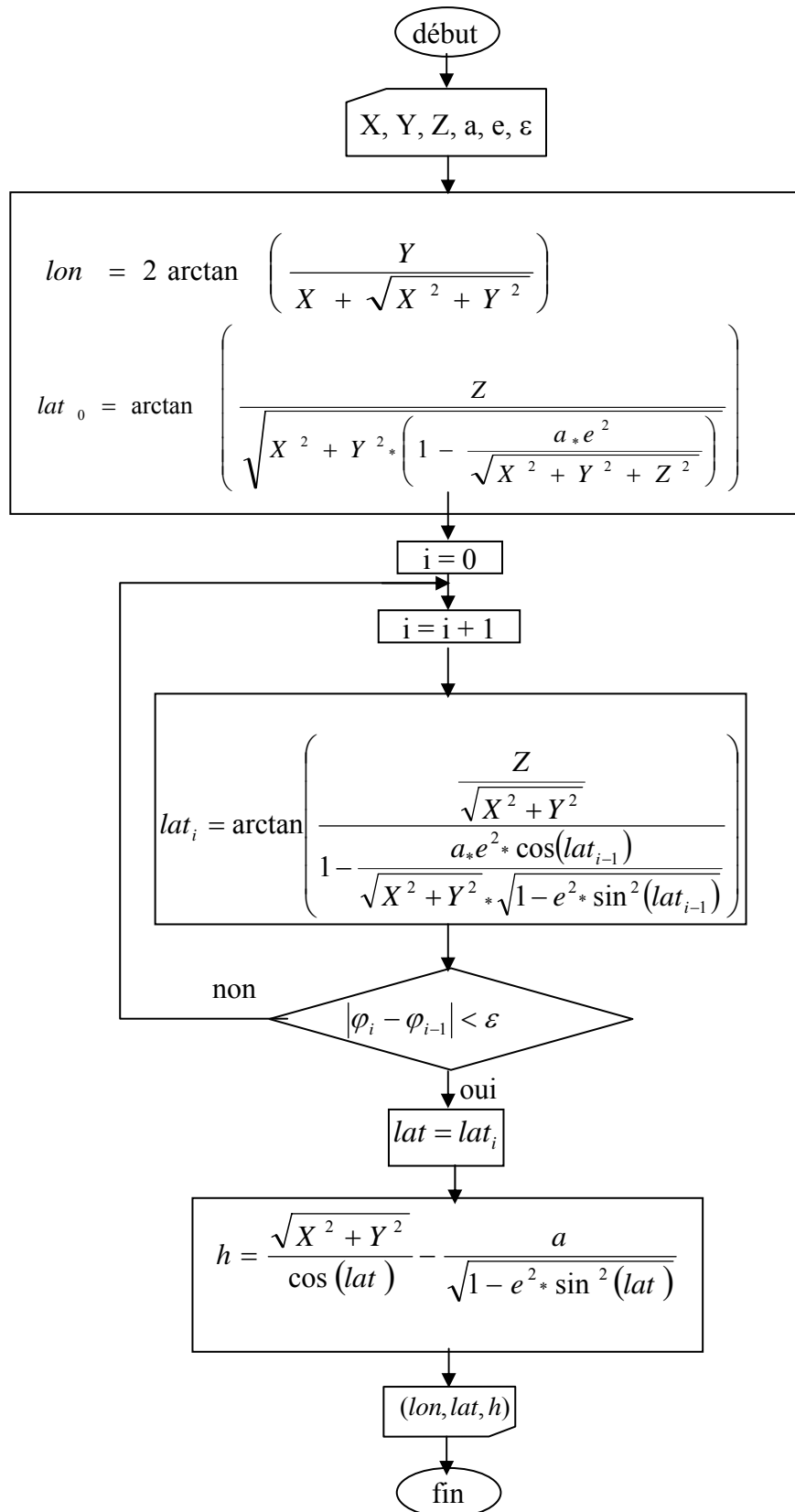


Figure II.11 : Organigramme de la transformation des coordonnées cartésiennes géocentriques aux coordonnées géographiques.

### **c. Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées planes:**

Les transformations des coordonnées géographiques en coordonnées planimétriques ou bien projection cartographique dépendent de formules spécifiques à chaque projection. Les différentes caractéristiques qui nous permettent de faire les projections cartographiques sont essentiellement les suivants :

- Le type de la projection,
- Le référentiel géodésique (datum) et ses paramètres,
- L'unité de la projection,
- La longitude origine ( $lon_0$ ) qui exprime le méridien de référence, et la latitude origine ( $lat_0$ ) donnant la position de la zone sur le globe,
- Les parallèles standard 1 et 2 ( $lat_1$  et  $lat_2$ ) qui délimitent, sur le globe, la zone considérée,
- Le faux Est (Easting) et le faux Nord (Northing) coordonnées du centre de l'ellipsoïde de référence (datum), par rapport au centre de la terre,
- Le facteur d'échelle.

Il est important de savoir que les projections ne nous permettent pas de conserver tous les paramètres géométriques à savoir la distance et la surface. Ainsi, suivant l'application nous utilisons une projection qui nous permet de conserver un paramètre bien défini. Cela nous conduit à une classification des projections d'une part, et d'une autre part, il est évident qu'on utilise le même type et la même méthode de projection qu'on soit aux pôles, ou à l'équateur ce qui nous amène à utiliser pour chaque zone une projection adaptée du point de vue type de déformation et aspect.

Dans ce qui suit, nous allons évoquer tous ces aspects un peu plus en détail.

### **II.7. Classification des projections planes :**

Processus qui consiste à transformer et à représenter sur une surface bidimensionnelle (plane) des points situés sur la surface sphérique tridimensionnelle de la terre. Ce processus fait appel à une méthode directe de projection géométrique ou à une méthode de transformation calculée mathématiquement.

On peut classer les différents types de projections cartographiques selon les caractéristiques suivantes :

- a. Les déformations des éléments de la surface à représenter.
- b. La surface de projection utilisée.
- c. L'aspect du système de projection.

### a) Projection selon le type de déformations :

- **Projections conformes :**

Elles conservent le rapport local des formes entre les figures de la surface de projection et celles de la sphère. Les altérations d'angles sont nulles. Les méridiens et les parallèles sont perpendiculaires. L'échelle est constante dans toutes les directions. Les méridiens et les parallèles se croisent à angle droit.

- **Projections équivalentes :**

Elles conservent le rapport local des surfaces. Les autres propriétés forme, angle et échelle sont déformées. Dans les projections équivalentes, les méridiens et les parallèles peuvent ne pas se couper à angles droits.

$$\frac{\text{surface mesurée sur la carte}}{\text{surface mesurée sur la sphère}} = \text{constante}$$

- **Projections quelconques (aphylactiques) :**

Elle n'est ni conforme, ni équivalente. Par exemple, pour les projections équidistantes où l'écartement des parallèles est constant. Elle conserve les rapports de distance le long de certaines lignes choisies comme les méridiens et les parallèles standard ou à partir du centre de la projection.

### b) Projection selon l'aspect:

La notion d'aspect traduit l'usage d'un pseudo-canevas pour qualifier la représentation:

- **Aspect direct:**

Utilisation du canevas des parallèles et des méridiens (figure II.12),

- **Aspect oblique :**

Utilisation d'un canevas oblique, obtenu à partir de 2 points P1 et P2 diamétralement opposés quelconques pris comme pseudo-pôles(figure II.13),

- **Aspect transverse :**

Utilisation d'un canevas transverse, obtenu à partir de 2 points P1 et P2 diamétralement opposés sur l'équateur pris comme pseudo-pôles (figure II.14).

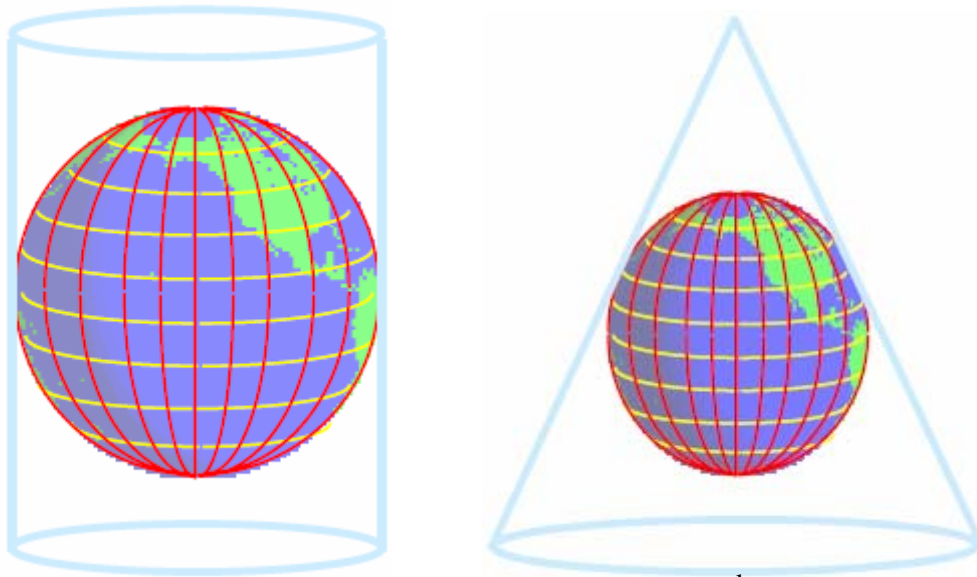


Figure II.12 : projection directe, a- cylindrique, b- conique

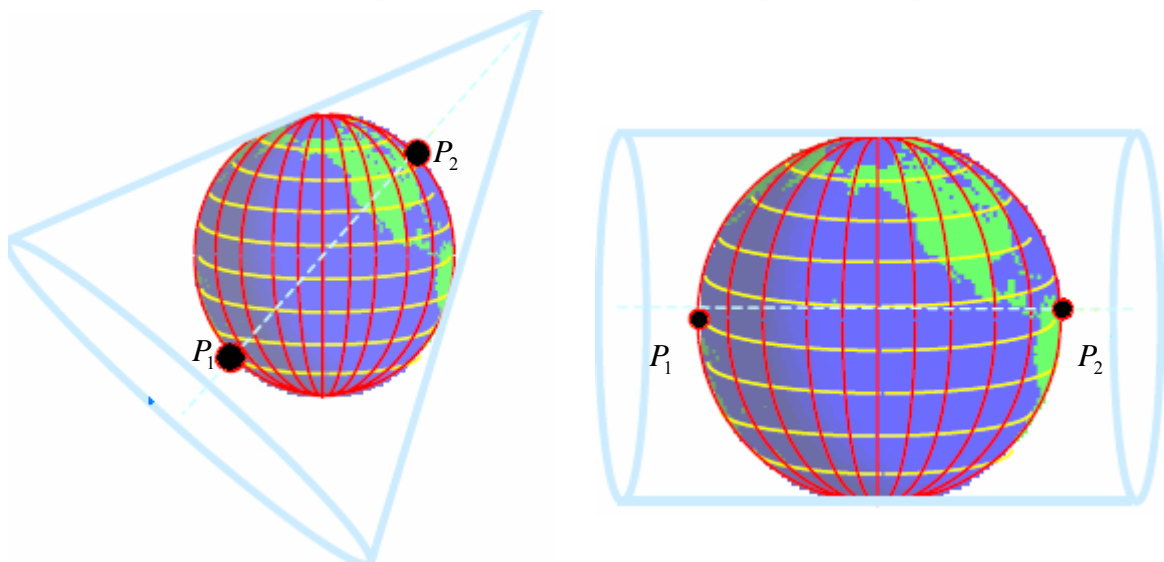


Figure II.13 : projection transverse conique. Figure II.14 : projection transverse cylindrique.

### C) Projection selon le canevas :

On classe aussi les représentations planes de l'ellipsoïde ou de la sphère selon leur canevas, c'est à dire l'image des méridiens et des parallèles en représentation :

- **Projections coniques :**

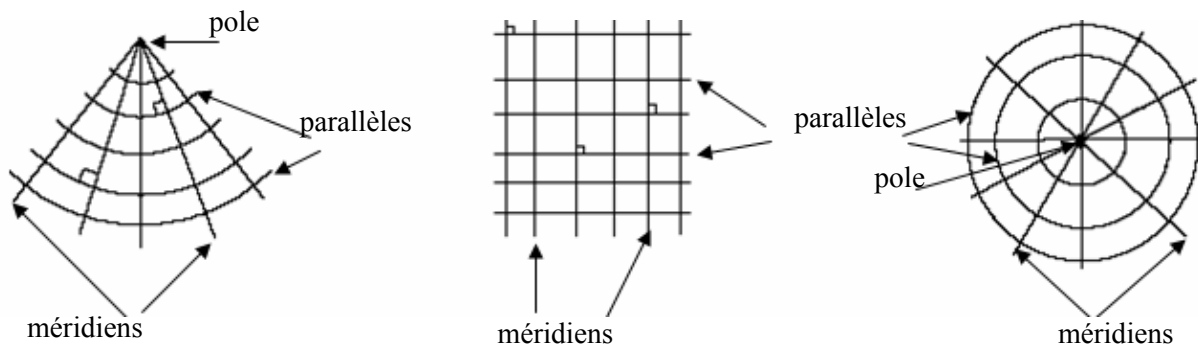
La surface projetée est un cône tangent ou sécant à la sphère. Dans ce type de représentation, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point image du pôle et les parallèles des arcs de cercles concentriques autour de ce point (figure II.15).

- **Projections cylindriques :**

La surface de référence à la forme d'un cylindre, tangent ou sécant à l'ellipsoïde. Dans ce type de représentation, l'image des méridiens est un faisceau de droites parallèles, et l'image des parallèles, un faisceau de droite parallèles, orthogonales à l'image des méridiens (figureII.15).

- **Projections azimutales :**

La projection azimutale consiste à projeter une portion de l'ellipsoïde sur un plan tangent à la sphère. Dans ce type de représentation, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point image du pôle. Les parallèles sont des cercles entiers concentriques autour de ce point (figureII.15).



FigureII.15 : Projections coniques, cylindriques et azimutales de gauche adroite respectivement.

Etant donner que notre région se situe entre les longitudes s  $lon_{\min} = 2.146^0$  ,  $lon_{\max} = 3.476^0$  et les latitude  $lat_{\min} = 35.934^0$  ,  $lat_{\max} = 37.050^0$  , Alors les types de projections les plus utilisés sont la projection de Lambert et la projection UTM.

**a) Projection de Lambert :**

La projection de Lambert est une représentation conique et conforme. Pour transformer les coordonnées géographiques en coordonnées Lambert, nous appliquons l'équation II.7 [26]:

$$\begin{aligned} X &= X_p + (C_* \exp(-n\zeta))_* \sin(n(lon - lon_0)) \\ Y &= Y_p - (C_* \exp(-n\zeta))_* \cos(n(lon - lon_0)) \end{aligned} \quad (II.7)$$

$$\text{Où } \zeta = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sin(lat)}{1 - \sin(lat)} - \frac{e}{2} \ln \frac{1 + e_* \sin(lat)}{1 - e_* \sin(lat)}$$

Cinq paramètres sont nécessaires pour définir une projection Lambert à savoir :

- $X_p, Y_p$  : les coordonnées du pôle.
- $n$  : l'exposant.
- $lon_0$  : longitude (origine) du méridien central.
- $C$  : une constante.

Pratiquement, on utilise un point origine  $P(lon_0, lat_0)$  et son image en représentation  $P(X_0, Y_0)$ .

Si on note  $R_0 = R(lat_0)$  et  $L_0 = L(lat_0)$ , on peut écrire les égalités suivantes :

$$\begin{cases} X_p = X_0 \\ Y_p = Y_0 + R_0 \\ C = R_0 \exp(nL_0) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

La représentation est alors définie par la donnée de  $X_0, Y_0, lon_0, lat_0, n$  et  $R_0$

La transformation inverse, des coordonnées planes LAMBERT aux coordonnées géographiques est obtenue par les expressions suivantes :

$$lon = lon_0 + \frac{1}{n} \arctan \frac{X - X_s}{Y_s - Y}$$

$$\psi = -\frac{1}{n} \ln \left| \frac{\sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2}}{C} \right|$$

$$lat_0 = 2 \arctan(\exp(\psi)) - \frac{\pi}{2}$$

$lat$  est obtenue par itération successive de la formule suivante :

$$lat_i = 2 \arctan \left( \left( \frac{1 + e_* \sin(lat_{i-1})}{1 - e_* \sin(lat_{i-1})} \right)^{(e/2)} \exp(\psi) \right) - \frac{\pi}{2} \quad (\text{II.9})$$

**b) Projection UTM :**

La projection initiale de Mercator est le développement d'un cylindre tangent à l'ellipsoïde le long de l'équateur. La projection de Mercator Transverse (UTM) est le développement d'un cylindre tangent à l'ellipsoïde le long d'un méridien. La terre est divisée en 60 fuseau identiques (d'où le qualificatif "d'Universel") de 6 degrés de longitude : 3 degrés de part et d'autre du méridien central représenté par une droite rectiligne perpendiculaire à l'équateur. Dans chaque fuseau la largeur diminue avec la latitude avec des corrections linéaires importantes en bord de fuseau. Le méridien origine d'un fuseau est pris comme axe Nord du quadrillage, l'équateur comme axe Est, les coordonnées de leur intersection valent E = 500 000 m et N = 0 m pour l'équivalent nord, N = 10 000 000 m pour l'hémisphère sud de manière à supprimer les coordonnées négatives.

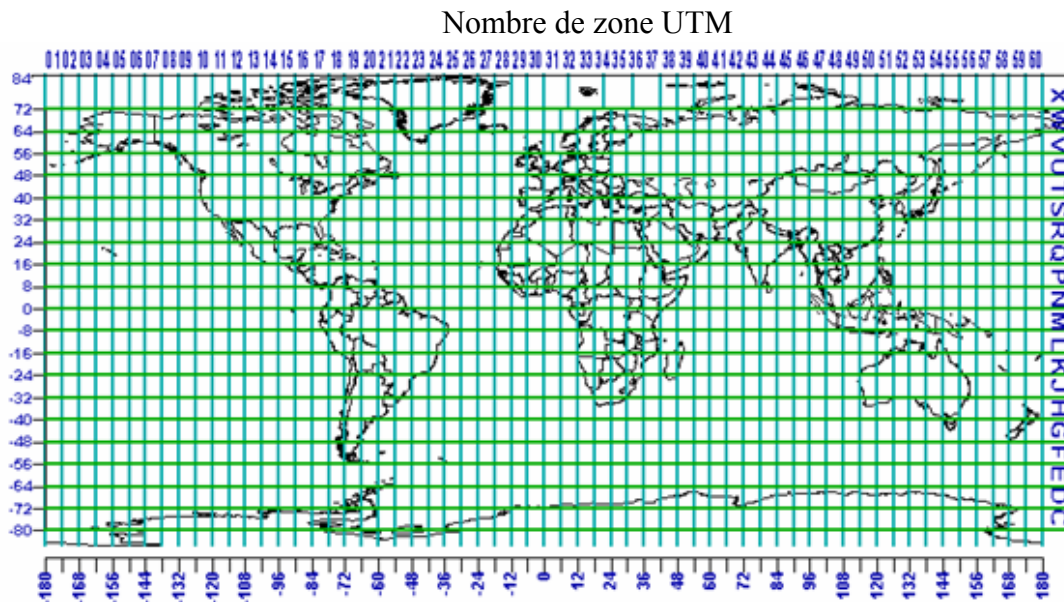


Figure II.16 : Projection de Mercator Transverse (UTM)

• **Passage des coordonnées géographiques aux coordonnées planimétriques :**

Pour transformer les coordonnées géographiques en coordonnées UTM, nous appliquons l'équation II.8.

$$E_{UTM} = E_{FE} + \frac{k_0 \cdot a \cdot \sqrt{1 + e^2}}{2 \cdot g^2} \cdot \ln\left(\frac{n + g \cdot \cos(lat) \cdot \sin \Lambda}{n - g \cdot \cos(lat) \cdot \sin \Lambda}\right) \tag{II.8}$$

$$N_{UTM} = N_{FN} + k_0 \left[ S(lat) + \frac{a \cdot \sqrt{1 + e^2}}{g^2} \left( \arctan \frac{\tan(lat)}{g \cdot \cos \Lambda} - \arctan \frac{\tan(lat)}{g} \right) \right]$$

Où

- $k_0 = 0.9996$
- $E_{FE} = 500000m$
- $n = [1 + (e')^2 \cos^4(lat)]^{1/2}$
- $\Lambda = n.(lon - lon_0)$
- $lon_0 = 6(i - 31) + 3$
- $\mathcal{G} = [1 + (e')^2 \cos^2(lat)]^{1/2}$
- $S(lat) = a[S_0.(lat) - S_2 \sin(2lat) + S_4 \sin(4lat) - S_6 \sin(6lat) + S_8 \sin(8lat)]$
- $e^2 = \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right)$
- $e'^2 = \left(\frac{a^2 - b^2}{b^2}\right)$

et

$$S_0 = 1 - \left(\frac{1}{4}\right).e + \left(\frac{3}{64}\right).e^2 + \left(\frac{5}{256}\right).e^3 + \left(\frac{175}{16384}\right).e^4$$

$$S_2 = -\left(\frac{3}{8}\right).e - \left(\frac{3}{32}\right).e^2 - \left(\frac{45}{1024}\right).e^3 - \left(\frac{105}{4096}\right).e^4$$

$$S_4 = \left(\frac{15}{256}\right).e^2 + \left(\frac{45}{1024}\right).e^3 + \left(\frac{525}{16384}\right).e^4$$

$$S_6 = -\left(\frac{35}{3072}\right).e^3 - \left(\frac{175}{12288}\right).e^4$$

$$S_8 = \left(\frac{315}{131072}\right).e^4$$

### • Passage des coordonnées planimétriques aux coordonnées géographiques

La transformation inverse est donnée par l'équation II.9

$$lon = lon_0 + \frac{1}{n} \arctan \frac{\tan[2 \arctan(\exp(\xi)) - \frac{\pi}{2}]}{\cos \eta}$$

II.9

$$lat = \arctan(\cos \zeta \tan \eta)$$

Où

$$\bullet lat_0 = \frac{N_{UTM} - N_{FN}}{k_0 a}$$

$$\bullet \xi = \frac{(E_{UTM} - E_{FN}) \mathcal{G}^2}{k_0 a \sqrt{1 + e'^2}}$$

$$\bullet \eta = [N_{UTM} - N_{FN} - S(lat_0)] \frac{\mathcal{G}^2}{k_0 a \sqrt{1 + e'^2}} + \arctan \frac{\tan(lat_0)}{\mathcal{G}}$$

$$\bullet \zeta = n. \sin(lon - lon_0)$$

### **Chapitre III :**

### **Méthodes de correction géométrique.**

Les deux aspects fondamentaux en imagerie satellitaire sont essentiellement liés à l'information radiométrique et à la position géométrique de celle-ci par rapport à une référence qui peut être le terrain, une carte ou tout simplement une autre image satellitaire que l'on prendra comme référence. Une image, lors de son acquisition par les capteurs embarqués sur les satellites, est entachée d'erreurs aussi bien sur l'information radiométrique que dans la correspondance géométrique du pixel par rapport au point observé sur le terrain.

Toute exploitation d'images satellitaires particulièrement l'imagerie radar SAR nécessite une étape préalable de correction géométrique et de géoréférencement. En effet, l'utilisation des images radar SAR pour la mise à jour des fonds cartographiques, ou pour la génération d'un MNT par un processus interférométrique exige la connaissance, pour chaque pixel, des coordonnées cartographiques.

Les approches de corrections géométriques des images satellitaires, dans un cadre général, peuvent être classées en trois approches : l'approche analytique, l'approche polynomiale et l'approche mixte.

### **III.1 Approche de correction géométrique :**

#### **III.1.1. Approche analytique :**

Dans cette approche, les modèles analytiques sont généralement utilisés. Dans ces modèles, on suppose que les origines des déformations et tous les paramètres qui peuvent intéresser la géométrie de l'acquisition sont parfaitement connues et fiables (les données éphémérides du capteur, la vitesse de la terre, l'angle de prise de vue ...).

Parmi les déformations modélisables, dans ce cas la nous, citons [4]:

- La déformation due à l'inclinaison de l'orbite du satellite (l'orientation nord sud).
- La déformation qui est due à la rotation de la terre.

#### **a) Correction de la déformation due à l'inclinaison de l'orbite du satellite :**

Généralement le plan de l'orbite du satellite est incliné d'un certain angle par rapport au plan nord-sud, alors l'image acquise ne sera pas enregistrée dans le sens nord-sud. Cette déformation est corrigée par la relation III.1 (la loi directe) [29, 4]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\xi) & \sin(\xi) \\ -\sin(\xi) & \cos(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Où  $(p, l)$  et  $(x, y)$  sont respectivement les coordonnées de l'image avant et après la correction de notre image.

La loi inverse est donnée par la relation III.2 :

$$\begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\xi) & -\sin(\xi) \\ \sin(\xi) & \cos(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Où  $\xi \approx \sin^{-1}(\cos \alpha / \cos(lat_c))$  [29, 35].

Tel que  $\xi$  est l'angle d'orientation de l'image par rapport à la direction du pôle nord,  $\alpha$  est l'inclinaison du plan de l'orbite du satellite et  $lat_c$  la latitude du centre de scène.

### b) Correction de l'effet de la rotation de la terre :

Il est clair que la rotation de la terre vers l'est entraîne un décalage des lignes de l'image vers l'ouest. Pour corriger cette déformation on doit appliquer la relation III.3 (loi directe) [4]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

La loi inverse est donnée par la relation III.4 :

$$\begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Où  $\varepsilon = -\frac{w_e \cos(lat) \cos(\xi)}{w_s}$ ,  $w_e$  et  $w_s$  sont respectivement la vitesse angulaire de la terre et du

satellite,  $lat$  est la latitude de lieu. Alors on peut dire que la correction est équivalente à un déplacement des lignes de l'image vers la gauche.

Malheureusement, la méthode analytique ne peut pas toujours être appliquée puisque les données nécessaires pour toute type de déformation ne sont pas toutes disponibles et fiables. Dans ce cas, nous utilisons d'autres méthodes comme les méthode polynomiales et les méthodes mixtes.

### III.1.2 Approche polynomiale à modèles de régression :

Dans cette approche, les causes de toutes les déformations géométriques et les paramètres de la prise de vue sont inconnus. Dans ce cas, nous utilisons un ensemble de points d'appui  $P$  tel que  $(x, y)$  sont les coordonnées des points de l'image et  $(E, N)$  leurs correspondants sur la référence [21].

Alors, il faut appliquer une transformation globale qui modélise toutes les déformations géométriques de l'image, en utilisant les points d'appuis identifiés sur l'image et sur la référence [4].

Pour cela il existe deux méthodes :

#### a) La méthode exacte :

Elle est utilisée lorsque les points d'appui sont connus avec exactitude et l'erreur au niveau des points d'appuis est nulle. La fonction d'interpolation passe par tous les points d'appui. Les équations mathématiques de cette méthode sont données par [4] :

$$\begin{aligned} E &= f(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x^{i-1} y^{j-1} \\ N &= g(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x^{i-1} y^{j-1} \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Où  $(a_{ij}, b_{ij})$  sont les coefficients des polynômes en  $E$  et en  $N$ .

Cette méthode présente deux inconvénients majeurs qui sont :

- 1) le polynôme est entièrement libre sauf aux points d'appui.
- 2) l'ordre du polynôme augmente rapidement avec le nombre de points d'appui.

#### b) La méthode approximée :

Si on compare la méthode exacte et la méthode approximée, cette dernière présente une erreur d'interpolation aux points d'appui, les expressions mathématiques sont données par les relations suivantes [4, 21]:

$$\begin{aligned} E_k &= f(x_k, y_k) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x_k^i y_k^j + e_{Ek} \\ N_k &= g(x_k, y_k) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x_k^i y_k^j + e_{Nk} \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Où  $n$  est l'ordre du polynôme.

$e_{Ek}$  et  $e_{Nk}$  sont les erreurs (résidus) dans les directions des  $E$  et  $N$  respectivement.

Les coefficients des polynômes  $a_{ij}$  et  $b_{ij}$  sont déterminés par la méthode des moindres carrés, à partir des coordonnées  $(x_k, y_k)$  et  $(E_k, N_k)$  relevées pour chaque point d'appui  $k$ . Ils sont déterminés par minimisation des erreurs  $e_{Ek}$  et  $e_{Nk}$  comme suit [4]:

$$\begin{aligned} e^2_{Ek} &= \left( E_k - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x_k^i y_k^j \right)^2 \\ e^2_{Nk} &= \left( N_k - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x_k^i y_k^j \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Les résidus du modèle sont utilisés à leur tour pour calculer l'erreur RMS (Root Mean Square), cette dernière permet d'évaluer la précision du notre modèle. L'erreur RMS en  $E$  et  $N$  sont calculées comme suit [35] :

$$\begin{aligned} RMS_E &= \left[ \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (e_{Ek})^{1/2} \right]^{1/2} \\ RMS_N &= \left[ \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (e_{Nk})^{1/2} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Où  $P$  est le nombre de points d'appui.

L'erreur globale  $RMS_{EN}$  est définie de la manière suivante :

$$RMS_{EN} = \left[ RMS_E^2 + RMS_N^2 \right]^{1/2} \quad (\text{III.9})$$

La relation qui lie minimum de points d'appui ( $P$ ) et l'ordre du polynôme est donnée par :

$$P = \frac{(n+1)(n+2)}{2} \quad (\text{III.10})$$

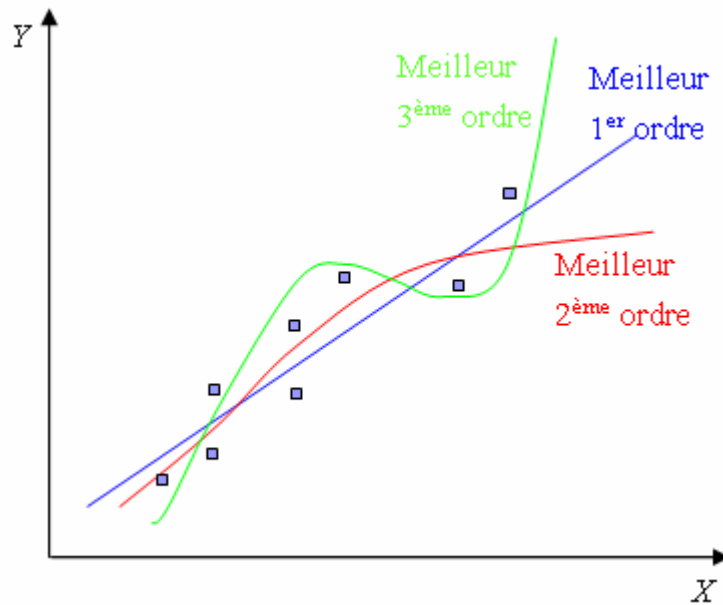


Figure III.1 : Influence de l'ordre du polynôme sur la correction géométrique

L'efficacité de ces polynômes (correction géométrique) dépend de [21] :

- La précision des points d'appui : elle est définie par une mesure exacte de déplacement.
- La densité des points d'appui : elle est définie par un nombre de points d'appui suffisant pour assurer la correction locale de la déformation.
- La répartition des points d'appui : la population des points d'appui doit être répartie de façon régulière sur toute l'image afin que la modélisation de la déformation soit homogène.

### III.1.3. Approche mixte (Hybride) :

Il y a aussi une troisième approche, nommée hybride, c'est une combinaison des deux premières approches. Généralement elle se fait en deux grandes étapes [4] :

- la première utilise l'approche analytique, elle permet d'évaluer une approximation de la correction géométrique grâce aux informations des conditions de prise de vue.
- La deuxième emploie l'approche globale, elle permet d'affiner le modèle de déformation ainsi défini en s'appuyant sur les correspondances des pixels de l'image et de la référence (points d'appui).

Face à toutes les distorsions géométriques que nous avons déjà vues dans le premier chapitre, il est impératif de les rectifier, à travers un processus de correction. La démarche méthodologique que nous avons développée dans le but de corriger les images radar SAR SLC est schématisée par l'organigramme de la figure III.2.

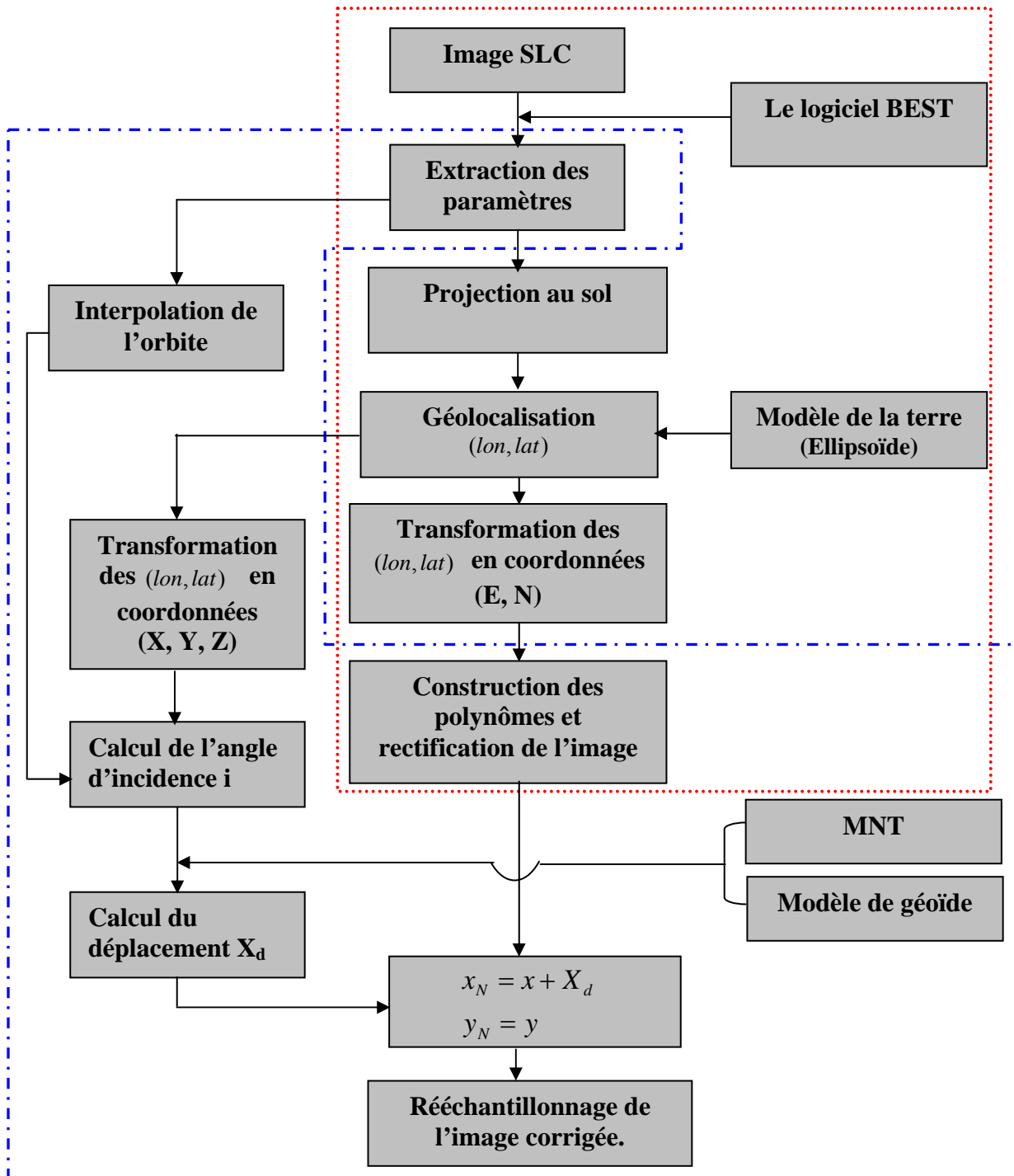


Figure III.2 : La démarche méthodologique développée.

Dans ce qui suit, nous donnons une explication détaillée sur quelques blocs de schéma de la figure III.2.

## III.2. Modélisation de l'orbite :

Le modèle d'orbite doit fournir, pour tout temps, les informations de la dynamique du porteur. Ces informations sont regroupées au sein du vecteur d'état, grandeur vectorielle fournissant la position et la vitesse du porteur. Dans le cas du radar SAR, il est nécessaire d'estimer le vecteur vitesse. Les mesures effectuées en vol permettent d'obtenir ce que l'on appelle les éphémérides, des mesures échantillonnées de la position et de la vitesse du porteur au cours du temps. Ces mesures servent à estimer les paramètres du modèle d'orbite, la modélisation de l'orbite se résume à un problème d'interpolation, qui se simplifie grandement si on effectue une étude dynamique de l'orbite du satellite. La mécanique classique permet en effet de modéliser complètement l'orbite [22].

Pour ce qui est des systèmes satellitaires, en absence de perturbations (dues à l'aplatissement et aux irrégularités de la terre, à l'attraction lunaire et solaire, à la pression de radiation et aux frottements), l'orbite peut être considérée de Kepler : le mouvement s'effectue le long d'une ellipse dont la terre est un des foyers en respectant la loi des aires. Si on tient compte des perturbations, les orbites qui sont de type quasi-polaires avec une excentricité faible, restent assimilables localement à des trajectoires circulaires légèrement perturbées. Sur des intervalles compatibles avec les temps d'acquisition d'une scène, un modèle d'interpolation suffit alors à la description de l'orbite du porteur [22].

On trouve dans la littérature deux types de modélisations qui se différencient par les grandeurs utilisées pour décrire l'orbite [22]:

- directement en interpolant la position et la vitesse du porteur au cours du temps.
- en interpolation les paramètres osculateurs de l'orbite.

### III.2.1. Modélisation de la position et la vitesse par l'interpolation :

Il s'agit du modèle le plus utilisé en imagerie SAR, il se formule en écrivant que le vecteur position du porteur obéit à une loi polynomiale [22, 1, 31]:

$$\begin{aligned} X_s &= a_x + b_x t + c_x t^2 + \dots \\ Y_s &= a_y + b_y t + c_y t^2 + \dots \\ Z_s &= a_z + b_z t + c_z t^2 + \dots \end{aligned} \tag{III.11}$$

Où  $(a_x, b_x, c_x, \dots, a_y, b_y, c_y, \dots, a_z, b_z, c_z, \dots)$  sont des paramètres estimés grâce aux éphémérides et  $t$  représente le temps. Il est à noter que, cette description ne se base sur aucune modélisation

physique de l'orbite ; elle est néanmoins justifiée par une étude de la dynamique du mouvement du porteur.

Pour estimer ces paramètres on utilise généralement le polynôme de Lagrange [1, 13].

$$P(t) = \sum_{j=1}^n \frac{P(t_j) \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t_j - t_i)} \quad (III.12)$$

$$V(t) = \sum_{j=1}^n \frac{V(t_j) \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (t_j - t_i)}$$

Où :

- $P(t_i)$  est la position du satellite au temps  $t_i$
- $V(t_i)$  est la position du satellite au temps  $t_i$
- $t_i$  correspond aux données éphémérides données dans le header.

### III.2.2. Modélisation des paramètres osculateurs :

Une description minimale fournie par une modélisation physique, en utilisant les lois de la dynamique et en incluant les perturbations, fournit une description plus légitime du modèle d'orbite. Elle découle du fait que l'orbite peut localement être considérée comme circulaire perturbée. La donnée des angles d'Euler  $j, w, \Omega$  et de la norme du vecteur position suffisent à la description de l'orbite. Ces grandeurs sont appelées paramètres osculateurs de l'orbite. Un développement en temps donne le modèle d'orbite [22]:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \rho_1 t + \rho_2 t^2 + \dots \\ j &= j_0 + j_1 t + j_2 t^2 + \dots \\ w &= w_0 + w_1 t + w_2 t^2 + \dots \\ \Omega &= \Omega_0 + \Omega_1 t + \Omega_2 t^2 + \dots \end{aligned} \quad (III.13)$$

Où, encore une fois les coefficients du développement limité se déduisent des éphémérides. Le passage entre paramètres osculateurs et vecteur d'état est donné par les relations :

$$\rho = \|\vec{V}_S^{\omega}\|$$

$$C = \vec{V}_S^{\omega} \wedge \vec{V}_S^{\omega}$$

$$j = \arccos(C_z / C)$$

$$\Omega = \arctan(-C_x / C_y) - \pi$$

$$w = \pi - \arcsin(V_{SZ} / [V_{SX} \cos \Omega + V_{SY} \sin \Omega] \sin(j))$$

Où  $V_S = [V_{SX}, V_{SY}, V_{SZ}]$  est le vecteur vitesse du porteur.

### III.3. Mode d'acquisition des images radar SAR :

L'orbite des satellites ERS1/2 est quasipolaire et héliosynchrone. Elle a une inclinaison de  $98,5^\circ$  et une altitude moyenne de 785 km [10].

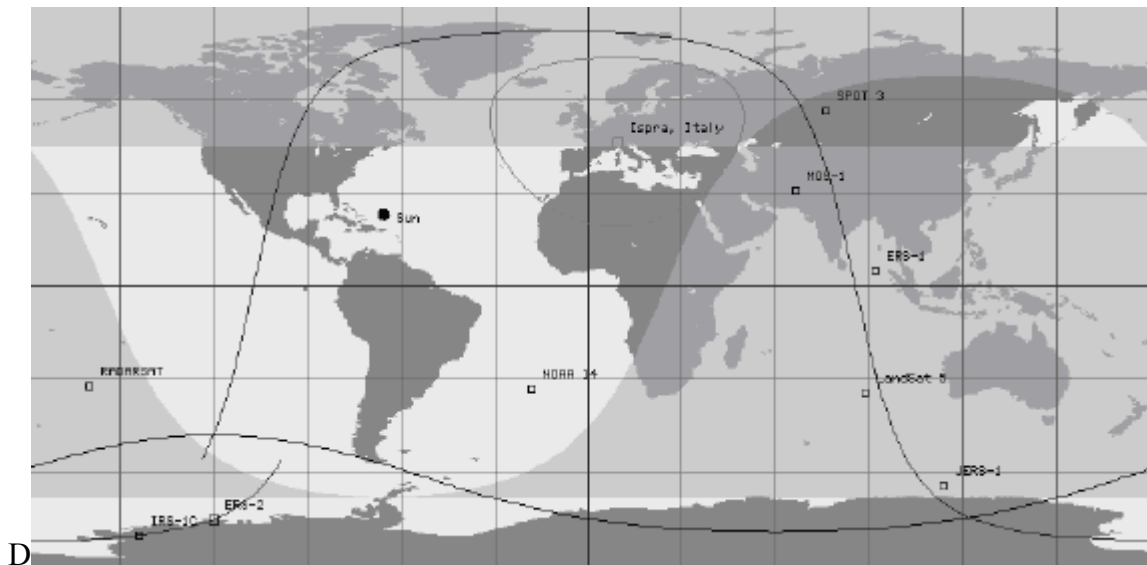


Figure III.3 : Orbite de ERS-1.

On distingue deux types de passage au dessus d'une même région : les passages de nuit que l'on appelle passages montant (ascendant), et les passages descendant correspondant aux passages de jour (voir figure III.4) [10].

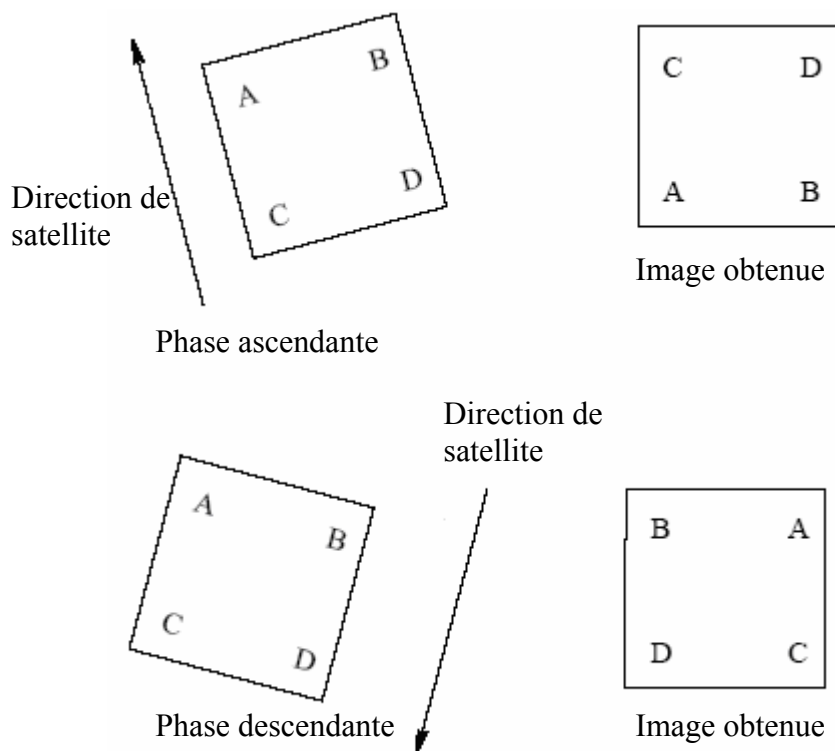


Figure III.4 : Effet de mode d'acquisition des images en phases ascendante et descendante.

### III.4. Géolocalisation de la cible :

Après avoir fait subir à l'image brute la synthèse d'ouverture, on obtient une image complexe du site observé en géométrie radar. Chaque ligne correspond à une position orbitale donnée du satellite, la première ligne étant acquise à la date  $t_0$ . Ainsi, les lignes suivantes, acquises lors d'impulsions ultérieures seront séparées d'un intervalle de temps proportionnel au  $1/PRF$ . Alors, les lignes sont séparées par la résolution  $\delta_a$ . Chaque colonne est repérée par sa distance au radar, la première colonne étant acquise à la distance  $R_{NR} = R_0$  (Near Range) ou portée proximale. Les colonnes suivantes, correspondant à des distances croissantes, sont séparées par la résolution  $\delta_r$  jusqu'à la colonne la plus éloignée (portée distale). Le passage entre coordonnées temps-distance  $[t, R]$  et coordonnées image  $[x, y]$  se fait par la relation [22, 19, 31].

$$\begin{bmatrix} t \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_a & 0 \\ 0 & \delta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

La figure III.5 illustre l'intervention des différentes équations de localisation d'une cible dans l'image radar [6].

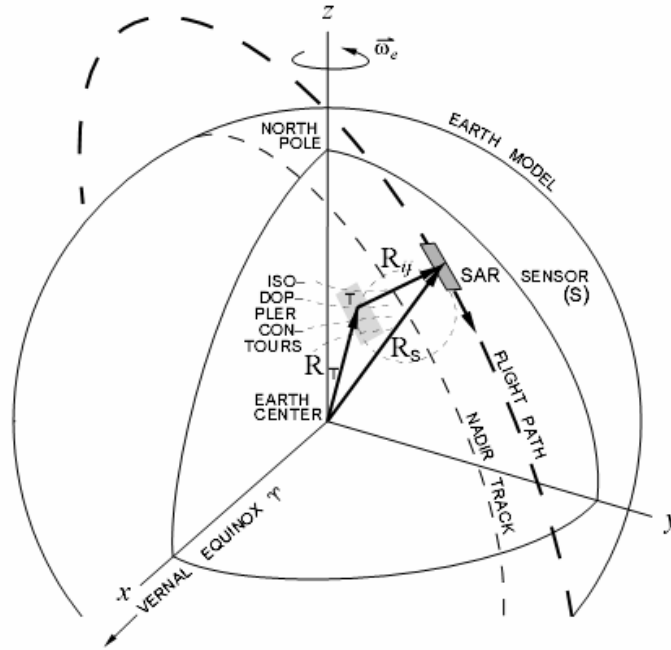


Figure III.5 : Intervention des trois équations de localisation de cible.

Soit un point de la surface terrestre, repéré par ses coordonnées géocentriques  $R_T = [X_T, Y_T, Z_T]$ , et un capteur radar positionnée en  $R_S = [X_S, Y_S, Z_S]$ . Ainsi les équations de localisation se déduisent [1, 23, 11, 17]:

### III.4.1. Equations de localisation :

#### a) Equation en distance :

Soit un point de la surface terrestre, repéré par ses coordonnées géocentriques  $R_T = [X_T, Y_T, Z_T]$ , et un capteur radar positionnée en  $R_S = [X_S, Y_S, Z_S]$ . Le radar localise le point  $T$  par [22, 16, 17]:

$$R = \|\vec{R}_S - \vec{R}_T\| = [(\vec{R}_S - \vec{R}_T) \cdot (\vec{R}_S - \vec{R}_T)]^{1/2} \quad (III.15.a)$$

Si on développe cette relation on trouve :

$$X_T^2 + Y_T^2 + Z_T^2 - 2X_S X_T - 2Y_S Y_T - 2Z_S Z_T + X_S^2 + Y_S^2 + Z_S^2 + R^2 = 0 \quad (III.15.b)$$

Les points vérifiant cette équation sont ceux de la sphère de rayon  $R$ , centrée sur la position du porteur.

### b) Equation Doppler :

Le traitement de compression en azimuth effectué à la fréquence Doppler centrale  $f_D$ , donnée par l'équation (I.17), permet d'écrire que les coordonnées du point terrain et du porteur vérifient [22, 6, 16,17].

$$f_D = -\frac{2}{\lambda R} (\hat{R}_S - \hat{R}_T) \cdot (\hat{V}_S - \hat{V}_T) \quad (\text{III.16})$$

La fréquence Doppler  $f_D$  représente l'angle de dépointage de l'antenne (angle entre la direction de visée et la trajectoire de satellite).

Où

- $V_S$  est la vitesse du radar.
- $V_T$  la vitesse de la cible qui est due a la rotation de la terre.

$V_T$  est donnée par la relation suivante [1, 6, 16, 17]:

$$\hat{V}_T = \hat{\omega}_e \wedge \hat{R}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_e \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} \quad (\text{III.17.a})$$

$$\hat{V}_T = \begin{bmatrix} -\omega_e \times Y_T \\ \omega_e \times X_T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17.b})$$

Où  $\omega_e$  représente la vitesse angulaire de la terre.

En développant l'équation Doppler

$$X_T(-\omega_e Y_S - V_{XS}) + Y_T(\omega_e X_S - V_{YS}) - Z_T V_{ZS} - (X_S V_{XS} + Y_S V_{YS} + Z_S V_{ZS} + f_D \frac{\lambda R}{2}) = 0 \quad (\text{III.18})$$

L'équation III.18 est celle d'un cône d'axe  $\hat{V}_S$  et de sommet  $S$ .

### c) Equation de l'ellipsoïde :

On plus des deux relations précédentes, on suppose que la cible appartient à la surface terrestre qui est modélisée par un ellipsoïde donné par l'équation (II.1) [17]. En développant cet équation nous obtenons :

$$X_T^2(b + N')^2 + Y_T^2(b + N')^2 - Z_T^2(a + N')^2 - (a + N')^2(a + N')^2 = 0 \quad (\text{III.19})$$

A partir des trois dernières équations nous obtenons un système d'équations non linéaires de deuxième ordre :

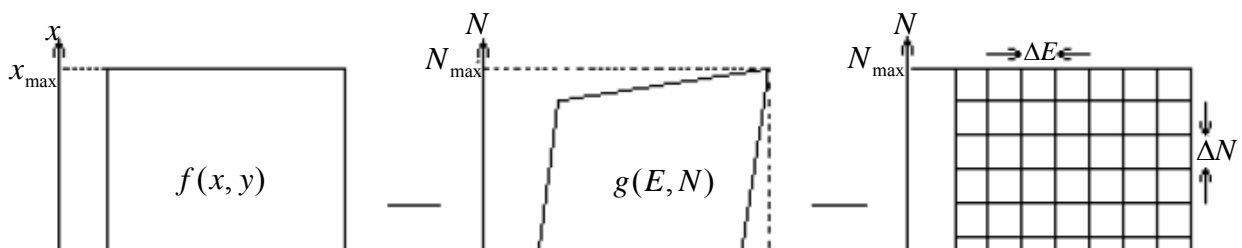
$$\begin{cases} X_T^2 + Y_T^2 + Z_T^2 - 2X_S X_T - 2Y_S Y_T - 2Z_S Z_T + X_S^2 + Y_S^2 + Z_S^2 + R^2 = 0 \\ X_T(-\omega_e Y_S - V_{XS}) + Y_T(\omega_e X_S - V_{YS}) - Z_T V_{ZS} - (X_S V_{XS} + Y_S V_{YS} + Z_S V_{ZS} + f_D \frac{\lambda R}{2}) = 0 \\ X_T^2(b + G)^2 + Y_T^2(b + G)^2 - Z_T^2(a + G)^2 - (a + G)^2(a + G)^2 = 0 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Ce système d'équation est résolu par la méthode de Newton-Rafeson, ainsi on obtient la solution de ce système que sont les coordonnées géocentriques de la cible [17, 23].

### III.5. Le rééchantillonnage radiométrique :

Les corrections géométriques sont constituées essentiellement par des rééchantillonnages qui constituent la dernière étape du prétraitement [24].

Le but de la rectification est la génération d'une image ayant au plus proche possible, la radiométrie de l'image déformée et la géométrie précise. Le rééchantillonnage radiométrique permet d'affecter à chaque point de l'image rectifiée la valeur radiométrique de l'image brute qui lui correspond. Pour chaque pixel de l'image rectifiée de coordonnées (x,y) qui sont des entiers correspond un point quelconque sur l'image brute de coordonnées (i,j) réels ( position n'étant pas exprimée en coordonnées entières ). Pour obtenir la radiométrie du pixel (x, y) de l'image rectifiée, on interpole à partir des pixels de l'image brute dans un voisinage plus ou moins étendu de (i, j). D'où la nécessité d'utiliser les deux lois directe et inverse (voir la figure III.6) [4].



La loi directe définit un modèle de passage qui, à chaque point de coordonnées (x, y) associe un point de coordonnées (i, j) sur l'image originale et permet de générer une grille de rectification. La dimension de celle-ci est donnée par [35]:

$$Nbr_{Col} = \frac{E_{max} - E_{min}}{\Delta E} \quad \text{et} \quad Nbr_{Lin} = \frac{N_{max} - N_{min}}{\Delta N} \quad (\text{III.21})$$

Tandis que la loi inverse fait correspondre à chaque nœud de la grille une radiométrie à partir du voisinage du point homologue de l'image brute.

En effet, il s'agit de déterminer le ou les pixels de l'image originale dont les radiométries doivent servir pour l'affectation de la radiométrie au pixel dans l'image rectifiée. Cette opération est réalisée par le rééchantillonnage radiométrique de l'image.

La théorie de l'échantillonnage montre que pour reconstituer le signal à partir d'échantillons, il faut appliquer un filtre de forme [4]:

$$h(x) = (1/x) \frac{\sin(\pi x / \Delta x)}{\pi x / \Delta x} \quad (\text{III.22})$$

Où le  $\Delta x = 1$  est le pas d'échantillonnage en  $x$  dans le cas d'une image numérique. Malheureusement, ce filtre n'est pas réalisable du fait qu'il n'est pas borné spatialement. Pour contourner ce problème, nous sommes amenés à utiliser des filtres interpolateurs sur un intervalle borné. L'image étant bidimensionnelle, le rééchantillonnage de celle-ci s'effectue en utilisant un filtre interpolateur de la forme :

$$I(x, y) = \sum_i \sum_j h(x-i, y-j) \cdot I(i, j) \quad (\text{III.23})$$

Où  $i$  et  $j$  déterminent le voisinage du point traité.

Alors la séparabilité du filtre  $h(x, y)$  nous permet d'écrire :

$$h(x, y) = h(x).h(y) \quad (\text{III.24})$$

L'intensité  $I(x, y)$  est déterminée selon que l'on utilise 1,4 ou 16 pixels voisins. Pour cela, plusieurs filtres sont utilisés. Le choix de l'un d'eux dans le processus de rectification est fonction, d'une part, de l'information contenue dans l'image, et d'une autre part, de l'utilisation de l'image générée dans les applications ultérieures (Annexe A):

Généralement, dans les images radar on utilise le filtre bilinéaire parce que d'une part, il réduit les distorsions géométriques (sur la localisation au maximum de 0.5 pixel) qui sont engendrées généralement par le filtre PPV (des effets de marches d'escalier sur les diagonales), et d'autre part, il conserve mieux la qualité radiométriques par rapport filtre bicubique.

Dans le chapitre qui suit nous allons mettre en oeuvre notre processus et nous présentons nos résultats.

## **Chapitre IV :**

**Application et résultats.**

Rappelons que notre travail dans ce mémoire a comme but la correction géométrique des images radar SAR SLC. Dans ce contexte, nous avons appliqué le processus déjà présenté dans le chapitre précédent (Figure III.2) sur des images SAR SLC acquises par les radars ERS1/ERS2 sur la région d'Alger. Ensuite nous avons présenté et évalué les résultats que nous avons obtenus.

#### IV.1. Prestation des données :

##### a) Présentation de MNT :

L'MNT que nous avons utilisé est réalisé par avec le logiciel Eath View. Les principales caractéristiques de ce MNT sont présentées dans le tableau ci-dessous :

| Taille (en pixel) | La résolution en mètre | Type et zone de projection | Datum  |
|-------------------|------------------------|----------------------------|--------|
| (2509, 2321)      | 27m×27m                | UTM, 31 Nord               | WGS-84 |

Tableau IV.1 : Caractéristiques de

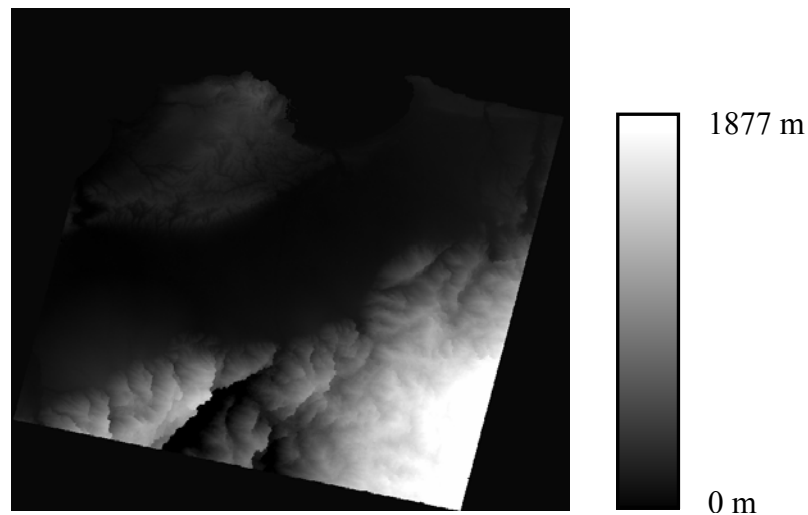


Figure IV.1 : L' MNT.

##### b) Les images radar SLC

Les données utilisées proviennent des satellites européens ERS1/ERS2 et ont été fournies par ESA. Les données sont deux images radar SLC en tandem ERS1/ERS2 de la région d'Alger et ses environs. Les caractéristiques des deux images sont données dans le tableau IV.4.

| Les satellites                                | ERS1                              | ERS2              |
|---|-----------------------------------|-------------------|
| Type de produit                               | SLCI (Single Look Complex Image ) |                   |
| Date d'acquisition                            | 03-01-1996                        | 04-01-1996        |
| Début de l'acquisition                        | 10 :30 :49.399                    | 10:30:51.284      |
| Fin de l'acquisition                          | 10 :31 :06.067                    | 10:31:07.952      |
| Orbite  | 23371                             | 3698              |
| Frame   | 2871                              | 2871              |
| mode  | Descendant                        | Descendant        |
| Taille des images                             | 4900×26581 pixels                 | 4900×26544 pixels |
| Fréquence Doppler $f_D$                       | 382.609 Hz                        | 150.578 Hz        |
| La hauteur de satellite $H$                   | 785 Km                            |                   |
| La PRF  | 1679.902 Hz                       |                   |
| Fréquence centrale de l'onde $f_0$            | 5.300 GHz                         |                   |
| Longueur d'onde $\lambda$                     | 5.66 cm                           |                   |
| Bande passante du chirp $B_{chirp}$           | 15.55 MHz                         |                   |
| Durée du signal (Impulsion)                   | 37.12 $\mu s$                     |                   |
| Station d'archive                             | Italian-IPAF                      |                   |
| Dimensions de l'antenne $L \times l$          | 10m × 1m                          |                   |
| Vitesse du satellite $V_s$                    | 7.5Km/s                           |                   |
| Angle d'incidence (au centre) $i_c$           | 23°                               |                   |
| Distance radar - centre du lobe d'antenne     | 850 Km                            |                   |
| Résolution en azimut $\delta_a$               | 7.902 m                           |                   |
| Résolution en distance $\delta_r$             | 4.066 m                           |                   |
| Fréquence d'échantillonnage en distance $f_e$ | 18.962468 MHz                     |                   |
| Inclinaison de l'orbite                       | 98.516°                           |                   |

Tableau IV.2 : Caractéristiques des images et des satellites ERS1/ERS2.

## IV.2. Application du processus de correction géométrique :

Les différentes distorsions géométriques qui entachent les images radar et la précision exigée pour l'utilisation de ces dernières dans divers domaines de recherche et d'application exige qu'une attention particulière soit accordée au processus général de correction géométrique des images radar SLC en intégrant différents paramètres et données auxiliaires (données orbitales, caractéristiques des capteurs radar, données de références, etc....). Dans le but de

corriger nos images radar SLC, nous avons réalisé un processus de correction géométrique basé sur une approche hybride. Il est donné par l'organigramme de la figure III.2. Les procédures réalisées à chaque niveau de cet organigramme ont été testées sur notre jeu de données.

Nous avons divisé ce processus en deux grandes étapes :

1. Dans la première étape, nous supposons que le terrain est plat, c'est à dire que nous n'avons pas pris en compte les distorsions dues aux reliefs (la terre est modélisée par une ellipse).
2. Dans la deuxième étape, nous avons pris en considération les distorsions géométriques dues aux reliefs.

#### **IV.2.1. Les corrections effectuées en supposant que le terrain est plat :**

Nous résumons les étapes essentielles pour la première correction dans la partie encadrée en rouge sur l'organigramme de la figure III.2.

Les paramètres que nous avons extraits à partir des images SLC (Header) en utilisant le BEST-405 sont représentés dans le tableau IV.2. Le BEST (Basic Envisat SAR Toolbox) est un logiciel qui a été conçu par l'ESRIN (European Space Research Institute) de ESA (European Spatial Agency), dont le but est de faciliter l'utilisation et la manipulation des données radar SAR qui parviennent des satellites ERS1/ERS2 et ENVISAT. Nous présentons, dans ce qui suit les étapes développées.

##### **a) Projection au sol et calcul de la résolution en distance :**

La composante "distance" des images SLC ne peut être directement assimilée à une position au sol, puisque la projection associée à cette composante est inclinée. Les distances vont donc être converties en termes de distance au sol [9]. Elles sont divisées par le sinus de l'angle d'incidence ' $i$ ' (Figure IV.3) [16, 11, 17].

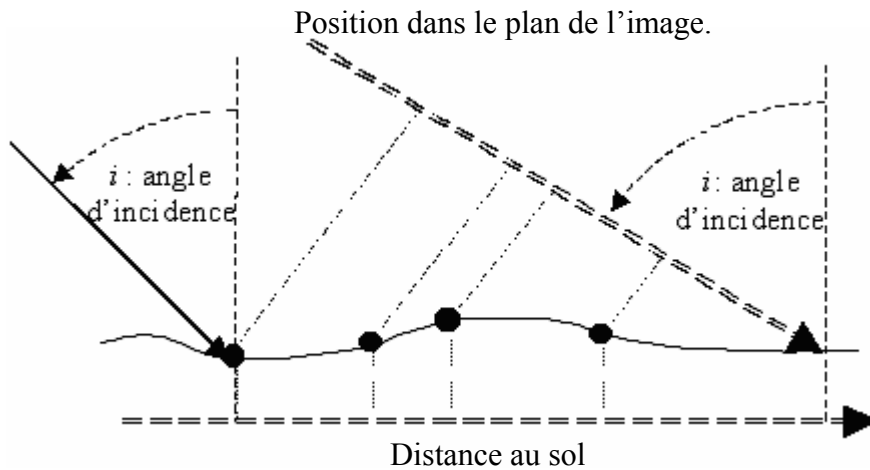


Figure IV.3 : Projection au sol.

Pour montrer la différence entre une image SLC non projetée et une image projetée au sol et l'influence de l'angle d'incidence sur la résolution en distance, nous avons extrait trois imagerie à partir de l'image SLC du 03-01-1996 en mode descendant et nous avons calculé la résolution en distance de chaque imagerie projetée à savoir :

1. La taille de la première est de (4900, 6000), elle a la même taille que l'image 03-01-1996 en distance et 6000 pixels en azimut.
2. La deuxième imagerie est extraite de la première imagerie, nous avons pris la partie qui s'étend de 0 à 2499 pixel (le premier pixel correspond au Near-range). Alors, la taille de cette imagerie est de (2450, 6000).
3. Le reste (de la première imagerie) représente la troisième imagerie qui a une taille de (2450,6000) aussi le dernier pixel correspond au Far-range.

Nous avons effectué, ensuite, la projection, (Le passage de l'image SLC vers l'image projeté (ground range)) en utilisant le BEST-405. Le tableau IV.3 illustre les résultats obtenus.

|  | Imagerie I         | Imagerie II<br>(1 <sup>ère</sup> moitié) | ImagerieIII<br>(2 <sup>ème</sup> moitié) |
|--|--------------------|--|--|
| La taille de l'imagerie SLC en distance          | 4900 pixels)       | 2450 pixels                              | 2450 pixels                              |
| La taille de l'imagerie Projetée en distance     | 5833 pixels        | 2797 pixels                              | 2706 pixels                              |
| Maximum de l'angle d'incidence                   | 26.56 <sup>0</sup> | 23.51 <sup>0</sup>                       | 26.56 <sup>0</sup>                       |
| La résolution en distance de l'imagerie projetée | 17.381 m           | 19.429 m                                 | 17.381 m                                 |

Tableau IV.3 : Les résultats de la projection.

Nous constatons que la résolution en distance de l'image projetée est donnée approximativement par :

$$\delta_{GR} \approx \frac{\delta_r}{\sin(\max(i))} \quad (IV.1)$$

Nous avons calculé la dimension en distance de la première imagerie et la somme des deux dimensions de la deuxième et la troisième imagerie, et nous avons obtenu approximativement le même résultat.

La dimension en distance = (nombre de pixel par ligne) × (la résolution en distance)

- La dimension de la première imagerie est :

$$D_1 = 5833 \times 17.381 = 101383,373 \text{ m}$$

- La somme de la dimension des deux imagerie est :

$$D_{2,3} = 2797 \times 19.429 + 2706 \times 17.381 = 101375,899 \text{ m}$$

Nous trouvons une différence de l'ordre de  $7\text{m}$  ( $\Delta D = |D_1 - D_{2,3}| = 7.474\text{m}$ ) qui est négligeable devant la largeur de la trace qui est de  $100\text{Km}$ .

Pour montrer l'influence de cette correction géométrique sur les dimensions des cibles au sol, nous présentons les images avant et après correction dans les figures IV.4 et IV.5.

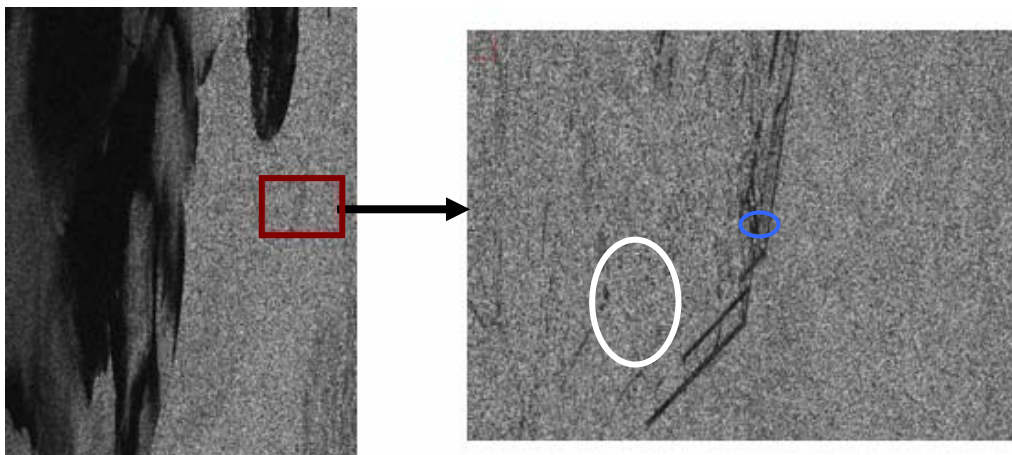


Figure IV.4 : Images non corrigées (SLC)

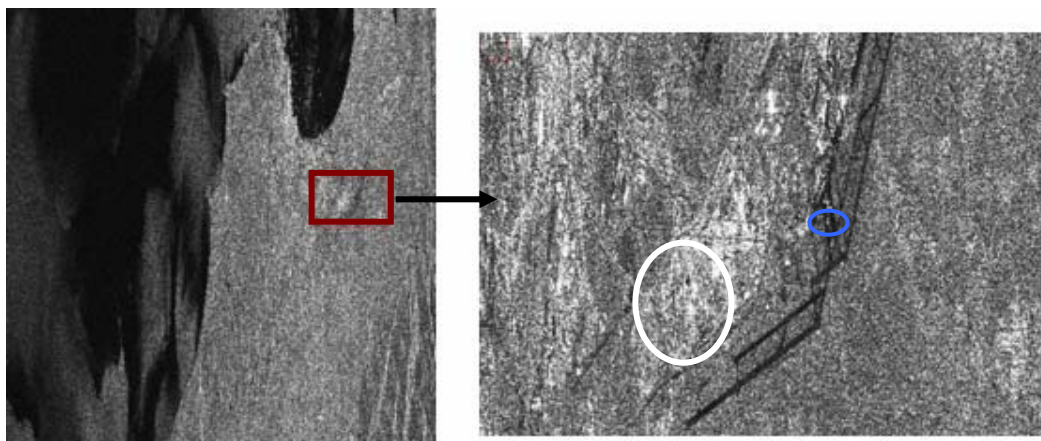


Figure IV.5 : images projetées au sol

Si nous comparons les deux images, nous constatons un agrandissement de la forme des cibles dans la direction en distance (voir zone encerclée en bleu dans les figures IV.4 et IV.5). C'est-à-dire les structures prennent leurs formes géométriques réelles sur le sol.

En plus de la correction géométrique des formes des cibles, nous constatons que, sur le plan radiométrique, les images projetées sont mieux contrastées et mettent en évidence la rugosité des états de surface (voir zone encerclée en blanc dans les figures IV.4 et IV.5).

### b) Géolocalisation de la cible dans une image radar :

C'est l'étape essentielle dans tout processus de géoréférencement d'images radar SAR. Elle consiste à déterminer les coordonnées géocentriques ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) de la cible qui correspond à un pixel dans l'image, sur la surface de la terre modélisée par un ellipsoïde lissé (sans tenir compte de la topographie de la cible) [23].

Les trois équations de localisation d'une cible sont données par le système d'équation (III.20) [22, 9, 16, 19]. C'est un système non linéaire de deuxième ordre et sa résolution est effectuée par la méthode de Newton-Raphson [23], c'est une méthode itérative ce qui la rend très coûteuse en temps d'exécution.

La vérification de la résolution de ce système, après son implémentation en utilisant des coordonnées des cibles de référence, nous a conduit à une grande différence entre les coordonnées de référence et celles obtenues. Après plusieurs tests, nous avons constaté que le problème réside dans la deuxième équation. Ce problème reste posé et nous n'avons pas pu le résoudre avec les données que nous avons actuellement. Pour cela, nous avons contourné ce problème par l'utilisation du logiciel BEST pour avoir un certain nombre de points que nous utilisons comme des points d'appui afin de mettre en œuvre une méthode globale.

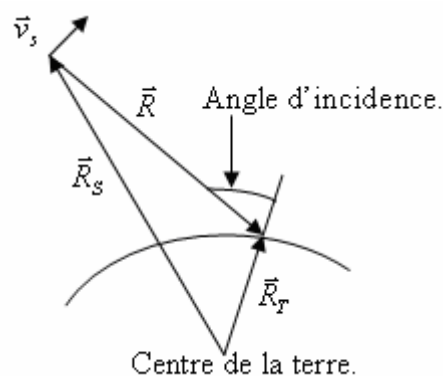


Figure IV.6 : Processus géométrique de géolocalisation.

Comme le BEST nous donne la position des pixels en coordonnées géographiques ( $lon, lat$ ), alors, nous devons les transformer en coordonnées planimétriques ( $E, N$ ).

- **Transformation des coordonnées géographiques ( $lon, lat$ ) vers les coordonnées planes ( $E, N$ ):**

Avant de faire le géocodage nous avons d'abord fait une transformation des coordonnées géographiques ( $lon, lat$ ) vers les coordonnées planes ( $E, N$ ) des pixels de notre échantillon, pour cela, nous avons appliqué l'équation II.8 en utilisant la même transformation que celle utilisées dans le MNT; c'est-à-dire la projection UTM. Les paramètres de cette projection sont donnés dans le tableau IV.4.

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Type de projection    | UTM         |
| La zone de projection | 31 Nord     |
| Datum                 | WGS 84      |
| Petit axe (b)         | 6356752,31m |
| Grand axe (a)         | 6378137.00m |
| Facteur d'échelle     | 0.99960     |
| Faux est.             | 500 000 m   |
| Faux nord.            | 0 m         |

Tableau IV.4 : Paramètres de la projection UTM.

Le tableau IV.5 nous montre le résultat de quelques points de la transformation effectuée.

| coordonnées géographiques ( $lon, lat$ )           | coordonnées planes ( $E, N$ ) en mètre |
|--|--|
| (2.3866440 <sup>0</sup> , 37.049792 <sup>0</sup> ) | (445461.3134, 4100571.8559)            |
| (2.8369410 <sup>0</sup> , 36.755562 <sup>0</sup> ) | (485445.3335, 4067763.7355)            |

Tableau IV.5 : Exemple de la projection UTM.

Après l'étape de géolocalisation, nous avons obtenu un grand nombre de points ; un échantillon de données qui se compose des coordonnées d'images et des coordonnées planimétriques. Avec ces derniers, nous avons déterminé un modèle polynomiale global en utilisant la méthode des moindres carrées [14, 23].

### c) Construction des polynômes et rectification de l'image :

- **Construction des polynômes :**

Nous avons employé un polynôme d'ordre deux, bicarré, pour adapter les deux coordonnées et pour construire deux ensembles différents avec des polynômes, un pour la transformation directe (équation IV.2), il permet de générer la grille de rectification et l'autre; la transformation inverse (équation IV.3), fait correspondre à chaque nœud de la grille une radiométrie à partir du voisinage du point homologue de l'image brute [15].

$$\begin{cases} E = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ N = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

$$\begin{cases} x = c_0 + c_1E + c_2N + c_3EN + c_4E^2 + c_5N^2 \\ y = d_0 + d_1E + d_2N + d_3EN + d_4E^2 + d_5N^2 \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

Où  $(x, y)$  sont des coordonnées image (les indices) et  $(E, N)$  sont les coordonnées planimétriques et  $(a_i, b_i, c_i, d_i)$  sont les coefficients des deux polynômes.

Avec cette méthode, nous pouvons ramener un pixel de l'image à sa position sur la carte (en coordonnées planimétriques) et vice-versa. C'est l'un des avantages de cette méthode. En outre, on peut éliminer le procédé itératif (qui est très coûteux en temps) pour générer la grille des positions, pour chaque point de l'image par la méthode des trois équations.

Pour valider cette méthode il est nécessaire d'évaluer les résidus au niveau de chaque pixel de notre échantillon.

- **Calcul des RMS :**

A cet effet, nous avons calculé les résidus à chaque point. Ces derniers sont estimés avec le modèle de déformation. Ce modèle est calculé en utilisant la loi inverse. Les résidus sont utilisés à leur tour pour le calcul de l'erreur RMS (Root Mean Square). Les résultats sont représentés dans le tableau IV.6.

| Root Mean Square | La valeur trouvée |
|------------------|-------------------|
| $RMS_E$          | 0.023458218       |
| $RMS_N$          | 0.0083192184      |
| $RMS_{EN}$       | 0.024889705       |

Tableau IV.6 : Résultats des résidus du modèle de transformation  
(Pour les pixels de notre échantillon)

Avec la même procédure nous avons calculé l'erreur RMS pour l'image complète (04-01-96). Les résultats sont représentés dans le tableau IV.7.

| Root Mean Square | La valeur trouvée |
|------------------|-------------------|
| $RMS_E$          | 0.10015924        |
| $RMS_N$          | 0.039564785       |
| $RMS$            | 0.10769051        |

Tableau IV.7 : Résultats des résidus du modèle de transformation.  
(Pour toute l'image)

Les résultats des RMS que nous avons trouvé (Tableau IV.6 et Tableau IV.7), erreurs très petites, nous permettent de valider les modèles de déformations.

- **Rectification de l'image :**

Il ne nous reste que la rectification de notre image. Cette étape consiste à attribuer à chaque position de la grille générée, une valeur radiométrique la plus proche possible à celle du pixel initial, pour cela nous avons utilisé les données du tableau IV.8.

|   |                  |
|---|------------------|
| Taille de l'image originale             | (5833,6000)      |
| Pas d'échantillonnage                   | 17.381m × 4.066m |
| Taille de l'image (la grille) rectifier | (5868,10763)     |
| Le rééchantillonnage                    | bilinéaire       |

Tableau IV.8 : Données utilisées pour la rectification de l'image.

L'image de la figure IV.7 représente le résultat de la rectification.

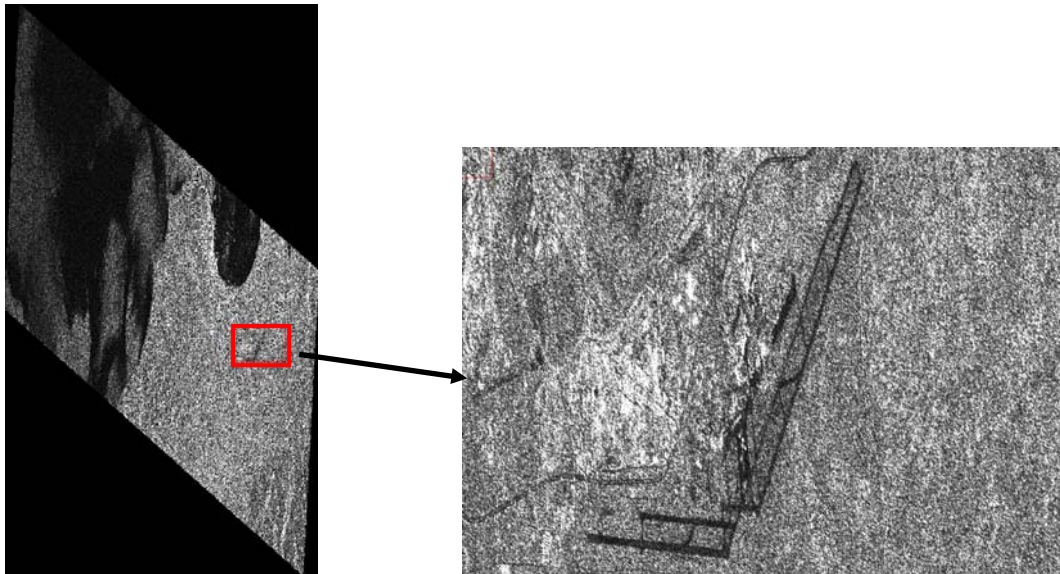


Figure IV.7 : La rectification de l'imagette.

Nous avons appliqué les mêmes étapes pour l'image complète (04-01-1996) (tableau IV.9) et les résultats sont représentés par la figure IV.8.

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Taille de l'image d'entrée     | (5833,26544)     |
| Pas d'échantillonnage          | 17.381m × 4.066m |
| Taille de l'image de rectifier | (6856,30433)     |
| Le rééchantillonnage           | bilinéaire       |

Tableau IV. 9 : Données utilisées pour la rectification de l'image.

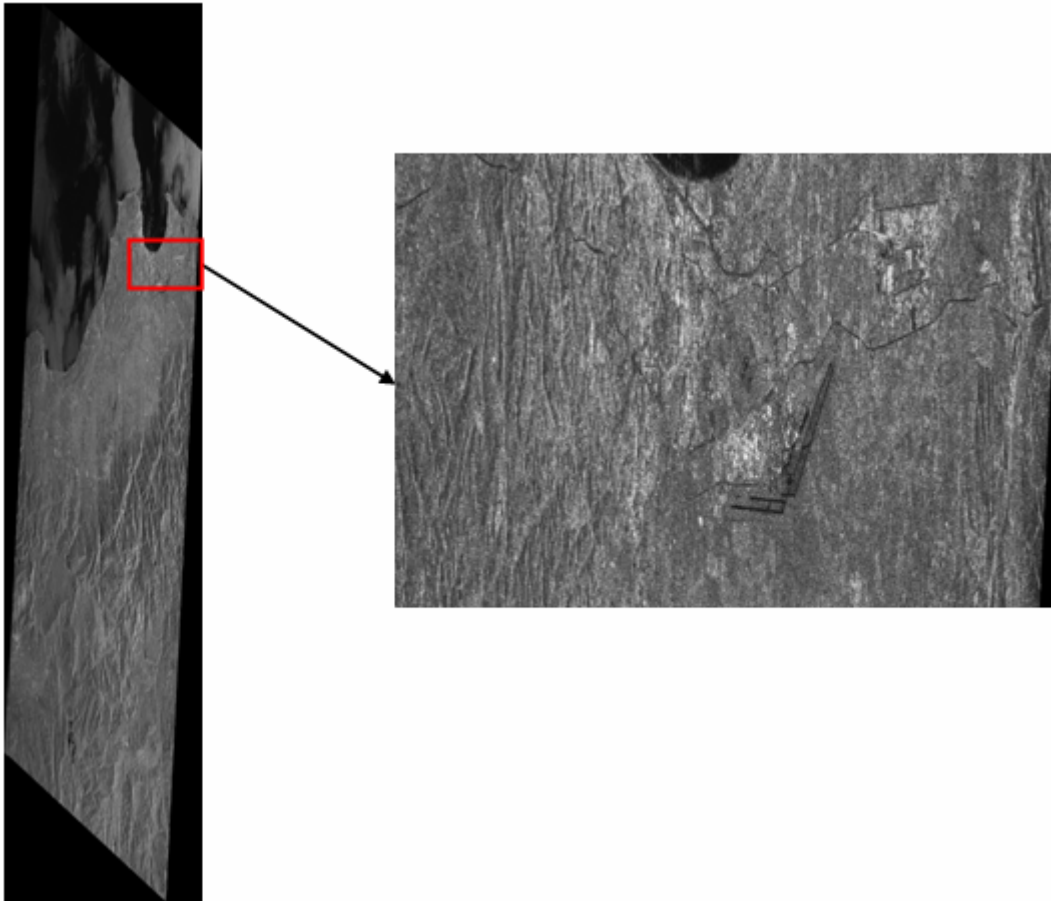


Figure IV.8 : La rectification de l'image complète

Dans le but d'obtenir les formes des objets réels ou bien un pixel carré au sol, nous avons effectué un rééchantillonnage en diminuant la résolution azimutale, nous avons généré une image avec une résolution égale à  $17.38\text{m} \times 17.38\text{m}$ . Le résultat est représenté à la figure IV.9.

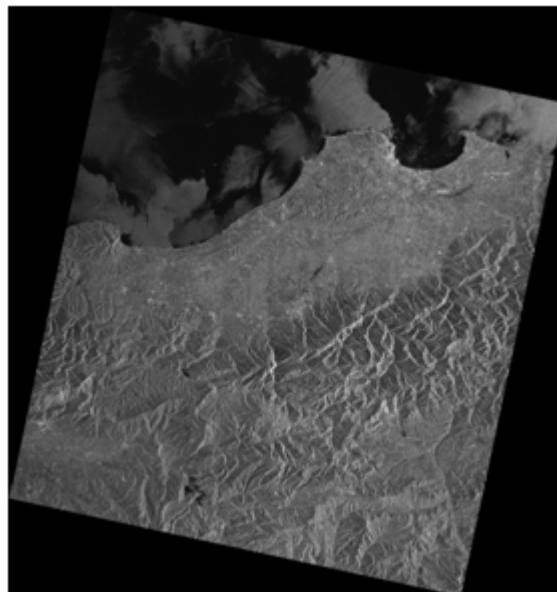


Figure IV.9 : L'image rectifiée et rééchantillonnée en azimut et en distance à une résolution de  $17.381\text{m} \times 17.381\text{m}$

## IV.2.2. Correction des déplacements dus aux reliefs :

Dans les étapes précédentes, nous avons supposé que le terrain est plat ce qui n'est pas le cas dans la réalité, alors on affecte des coordonnées cartographiques (planimétriques) au pixel de l'image radar en assimilant la surface terrestre à un ellipsoïde. Dans ce qui suit, nous prenons en compte les distorsions dus aux reliefs [27, 28, 17]. Les étapes essentielles de cette partie, sont présentées dans la partie encadrée en bleu sur l'organigramme de la figure III.2.

### a) Modélisation de l'orbite :

D'une façon générale, en imagerie satellitaire la modélisation de l'orbite du porteur est indispensable pour la superposition, la rectification et le recalage des images radar. Les mesures effectuées en orbite permettent d'obtenir ce que l'on appelle les éphémérides, donnant des mesures échantillonnées de la position et de la vitesse du porteur au cours du temps (5 points de positions et vitesses par rapport au repère géocentrique), voir le tableau IV.10. Ces mesures servent à estimer les paramètres du modèle d'orbite proprement dit. Ainsi, la modélisation de l'orbite se résume à un problème d'interpolation.

A partir des données du tableau IV.2 à savoir : le temps du début d'acquisition ; le zéro Doppler de la première ligne et la dernière ligne de l'image, nous avons déduit :

1. La durée du temps entre le début de l'acquisition de données brutes et le temps zéro Doppler qui correspond au début de notre image (la première ligne de image SLC) est (Tableau IV.1):

$$\Delta t = 0.913 - 0.399 = 0.514s$$

En multipliant le  $\Delta t$  par la  $PRF$ , nous trouvons le nombre de pixels entre le début de l'acquisition des données brutes et le premier zéro Doppler (selon la direction du déplacement du satellite).

$$\Delta t * 1679.902 \approx 863 \quad pixels$$

2. La durée entre la première et la dernière ligne de l'image SLC est donnée par:

$$Temps_{eff} = (L'heure de dernier zéro Doppler) - (L'heure de premier zéro Doppler)$$

$$Temps_{eff} = 65.735 - 49.913 = 15.822s$$

En multipliant ce temps effectif d'acquisition de l'image par la  $PRF$ , nous trouvons le nombre de pixels en azimut qui représente la taille de l'image SLC en azimut

$$\text{Nombre de pixels} = 15.822 * 1679.902 \approx 26581 \text{ pixels}$$

Ce résultat correspond bien au nombre de lignes dans l'image SLC qui est donné dans le fichier entête.

|   | La première image<br>03-01-96 (ERS-1)  | La deuxième image<br>04-01-96 (ERS-2)  |
|---|--|--|
| Nombre de points.   | 05   | 05   |
| Le temps entre les points                                   | 4.1670 s   | 4.1670 s   |
| Les coordonnées de la position<br>des 05 points (en mètre). | X <sub>1</sub> =5741989.71<br>Y <sub>1</sub> =619846.920<br>Z <sub>1</sub> =4230977.54       | X <sub>1</sub> =5742055.13<br>Y <sub>1</sub> =620031.350<br>Z <sub>1</sub> =4230868.78       |
|   | X <sub>2</sub> =5760729.27<br>Y <sub>2</sub> =614336.880<br>Z <sub>2</sub> =4206304.85       | X <sub>2</sub> =5760794.42<br>Y <sub>2</sub> =614522.210<br>Z <sub>2</sub> =4206195.71       |
|   | X <sub>3</sub> =5779357.46<br>Y <sub>3</sub> =608803.950<br>Z <sub>3</sub> =4181552.69       | X <sub>3</sub> =5779422.34<br>Y <sub>3</sub> =608990.189<br>Z <sub>3</sub> =4181443.19       |
|   | X <sub>4</sub> =5797873.92<br>Y <sub>4</sub> =603248.330<br>Z <sub>4</sub> =4156721.54       | X <sub>4</sub> =5797938.53<br>Y <sub>4</sub> =603435.470<br>Z <sub>4</sub> =4156611.68       |
|   | X <sub>5</sub> =5816278.29<br>Y <sub>5</sub> =597670.180<br>Z <sub>5</sub> =4131811.87       | X <sub>5</sub> =5816342.62<br>Y <sub>5</sub> =597858.220<br>Z <sub>5</sub> =4131701.64       |
| Les coordonnées de la vitesse<br>des 05 points (m/s).       | V <sub>x1</sub> =4510.57573<br>V <sub>y1</sub> =-1319.57567<br>V <sub>z1</sub> =-5911.53191  | V <sub>x1</sub> = 4510.51043<br>V <sub>y1</sub> =-1319.35665<br>V <sub>z1</sub> =-5911.6207  |
|   | V <sub>x2</sub> = 4483.89248<br>V <sub>y2</sub> =-1325.08546<br>V <sub>z2</sub> =-5930.65750 | V <sub>x2</sub> = 4483.82706<br>V <sub>y2</sub> =-1324.86723<br>V <sub>z2</sub> =-5930.74577 |
|   | V <sub>x3</sub> = 4457.12158<br>V <sub>y3</sub> =-1330.55419<br>V <sub>z3</sub> =-5949.67123 | V <sub>x3</sub> = 4457.05604<br>V <sub>y3</sub> =-1330.33675<br>V <sub>z3</sub> =-5949.75897 |
|   | V <sub>x4</sub> = 4430.26356<br>V <sub>y4</sub> =-1335.98170<br>V <sub>z4</sub> =-5968.57273 | V <sub>x4</sub> = 4430.19791<br>V <sub>y4</sub> =-1335.76506<br>V <sub>z4</sub> =-5968.65994 |
|   | V <sub>x5</sub> = 4403.31896<br>V <sub>y5</sub> =-1341.36784<br>V <sub>z5</sub> =-5987.36164 | V <sub>x5</sub> = 4403.25319<br>V <sub>y5</sub> =-1341.15200<br>V <sub>z5</sub> =-5987.44832 |
| Temps de début d'acquisition<br>des données brute.          | 03-JAN-1996 10:30:49.399   | 04-JAN-1996 10:30:51.284   |
| Temps du premier zéro Doppler                               | 03-JAN-1996 10:30:49.913   | 04-JAN-1996 10:30:51.692   |
| Temps du dernier zéro Doppler                               | 03-JAN-1996 10:31:05.735   | 04-JAN-1996 10:31:07.492   |

Tableau IV.10 : Données éphémérides utilisées pour la modélisation de l'orbite.

Alors à partir des données du tableau IV.10, nous pouvons modéliser l'orbite par une interpolation en utilisant le polynôme de Lagrange (Equation III.12).

Le tableau IV.11 nous montre une comparaison d'un échantillon de position entre l'interpolation avec le polynôme de Lagrange que nous avons mis en œuvre et les données fournies par le site web (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorb/s/>). Nous remarquons que les valeurs des positions sont presque identiques.

| Interpolation par Lagrange (m)                                   | Site web <a href="http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/">http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/</a> (m) | La différence (m)                                       |
|--|--|---|
| X(1000)=5746990.00<br>Y(1000)=618381.94<br>Z(1000)=4224415.50    | X(1000)=5746990.94<br>Y(1000)=618381.83<br>Z(1000)=4224414.95  | $\Delta X=0.94$<br>$\Delta Y=-0.11$<br>$\Delta Z=-0.55$ |
| X(10000)=5771025.50<br>Y(10000)=611285.75<br>Z(10000)=4192652.79 | X(10000)=5771024.98<br>Y(10000)=611285.76<br>Z(10000)=4192652.57   | $\Delta X=-0.52$<br>$\Delta Y=0.01$<br>$\Delta Z=-0.22$ |
| X(15000)=5784298.50<br>Y(15000)=307327.06<br>Z(15000)=4174949.80 | X(15000)=5784297.67<br>Y(15000)=607327.19<br>Z(15000)=4174950.05   | $\Delta X=-0.83$<br>$\Delta Y=0.13$<br>$\Delta Z=0.25$  |
| X(25000)=5810672.00<br>Y(25000)=599375.07<br>Z(25000)=4139423.50 | X(25000)=5810671.62<br>Y(25000)=599375.48<br>Z(25000)=4139424.70   | $\Delta X=-0.38$<br>$\Delta Y=0.41$<br>$\Delta Z=-1.20$ |

Tableau IV. 11 : Résultats de l'interpolation de l'orbite.

Ensuite nous avons découpé à partir de notre image rectifiée la même région (géographique) que celle du MNT. Le MNT est délimité par les coordonnées planimétriques suivantes :

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| $(E_{\min}, E_{\max})$ | (472590.00 m, 540306.00 m)   |
| $(N_{\max}, N_{\min})$ | (4083342.00 m, 4020702.00 m) |

Tableau IV. 12 : Les limites géographiques du MNT.

Nous avons rééchantillonné l'image rectifiée afin de ramener la résolution de cette dernière à celle de l'MNT, c'est-à-dire à  $(27m \times 27m)$ , et nous avons obtenu l'image de la figure IV.11.

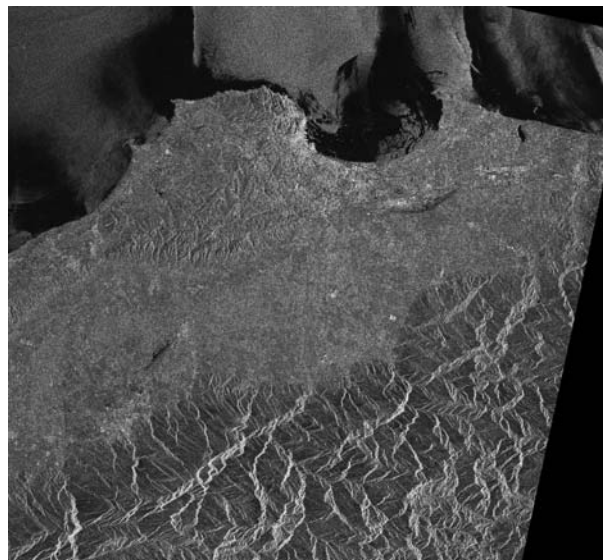


Figure IV. 11 : L'image rééchantillonnée en azimut et en distance à une résolution de  $27m \times 27m$ .



- **Transformation des coordonnées géographiques ( $lon, lat$ ) vers les coordonnées géocentriques ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) :**

Cette étape est indispensable pour calculer l'angle d'incidence. La transformation de ( $lon, lat$ ) vers les coordonnées géocentriques ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) est faite en appliquant la relation de l'équation (I.31) :

Si nous prenons par exemple l'ellipsoïde du WGS-84 ( $a= 6378144$   $b= 6356759$ ) on aura :

| coordonnées géographiques ( $lon, lat$ ) | coordonnées géocentriques ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) |           |           |
|--|---|-----------|-----------|
| $35.00^0, 2.80^0, 0$ m                   | 5224182.5                                     | 255505.16 | 3637866.5 |
| $36.00^0, 3.00^0, 0$ m                   | 5158918.5                                     | 270367.50 | 3728191.0 |

Tableau IV.13 : Exemple de cette transformation.

Dont le but de valider le résultat du tableau IV.13, nous avons fait une comparaison de cette transformation sur un point ( $36.3594031^0, 6.152003200, 788664.375$ ) entre notre programme et les résultat donner par le site (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precors/>) tableau IV.14.

| <a href="http://www.deos.tudelft.nl/ers/precors/">http://www.deos.tudelft.nl/ers/precors/</a> ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) | Notre résultat ( $X_T, Y_T, Z_T$ )  |
|---|-------------------------------------|
| (5744306.67, 619163.03, 4227940.13)   | (5744307.00, 619163.06, 4227940.00) |

Tableau IV.14 : Validation de la transformation.

D'après le tableau IV.14 on remarque qu'il y a une légère différence, alors nous pouvons valider notre implémentation.

- **Calcul de l'angle d'incidence :**

En effet, nous pouvons calculer l'angle d'incidence par la relation de l'équation I.31 en utilisant  $R_T(X_T, Y_T, Z_T)$  et  $R_S(X_S, Y_S, Z_S)$  (sont respectivement les coordonnées géocentriques du radar et de la cible) que nous avons déjà calculé.

Nous avons présenté un échantillon de résultat dans le tableau IV.15.

|           |               |               |               |               |               |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Pixel     | (0,0)         | (2068,0)      | (0,2320)      | (2133,2320)   | (1254,1160)   |
| Angle $i$ | $24.393757^0$ | $20.481537^0$ | $23.487549^0$ | $19.406265^0$ | $21.579468^0$ |

Tableau IV.15 : Angle d'incidence.

Ensuite nous avons calculé  $X_d$  en appliquant la formule (IV.4). Le résultat du déplacement  $X_d$  est représenté par la figure IV.14 :

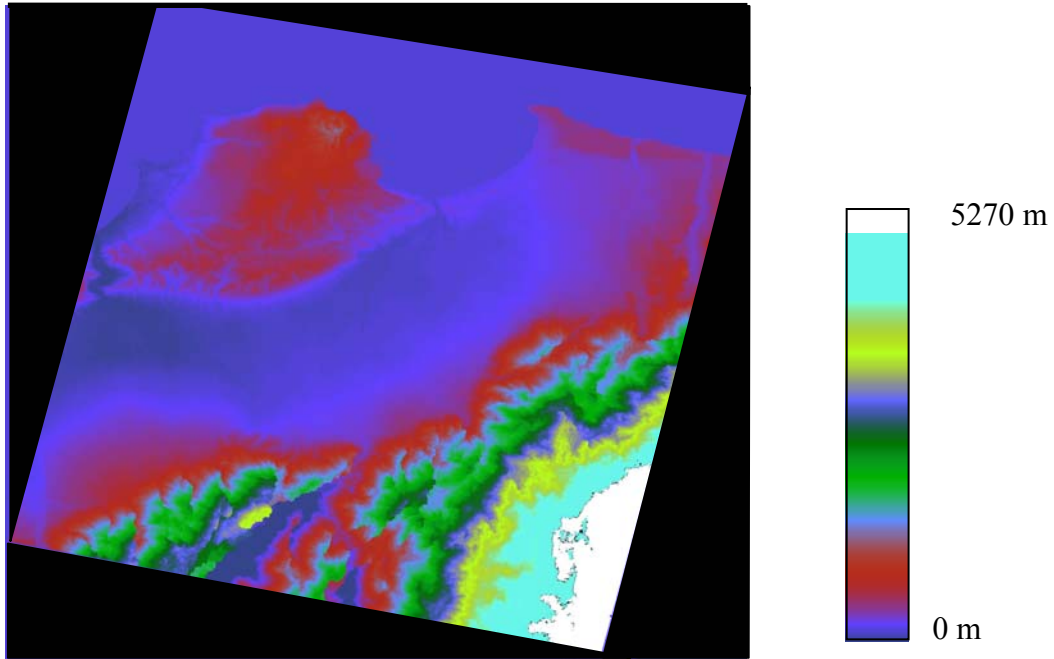


Figure IV.14 : Les déplacements  $X_d$ .

Nous remarquons qu'il a l'apparence visuelle d'un MNT.

Le tableau IV.14 nous montre l'influence de  $h$  et  $i$  sur le  $X_d$  (on a pris  $N' = 0$ ).

| $h$ (m) | $X_d$ pour $i = 19^\circ$ | $X_d$ pour $i = 23^\circ$ | $X_d$ pour $i = 26^\circ$ |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 100     | 290.42                    | 235.58                    | 205.030                   |
| 1000    | 2904.21                   | 2358.85                   | 2050.30                   |
| 2000    | 5808.42                   | 4711.70                   | 4100.60                   |

Tableau IV.16 : Exemple des déplacements  $X_d$ .

### c) Calcul des nouvelles positions des pixels :

La position finale du pixel  $(x_N, y_N)$  est affectée par les facteurs suivants :

- Les coordonnées évaluées par les polynômes de géocodages (la première rectification).
- Déplacements dus au relief ( $X_d$ ).

Par conséquent, la position finale du pixel est exprimée par :

$$\begin{cases} x_N = x + X_d \\ y_N = y \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Après cette correction, nous avons obtenus l'image de la figure IV.15.

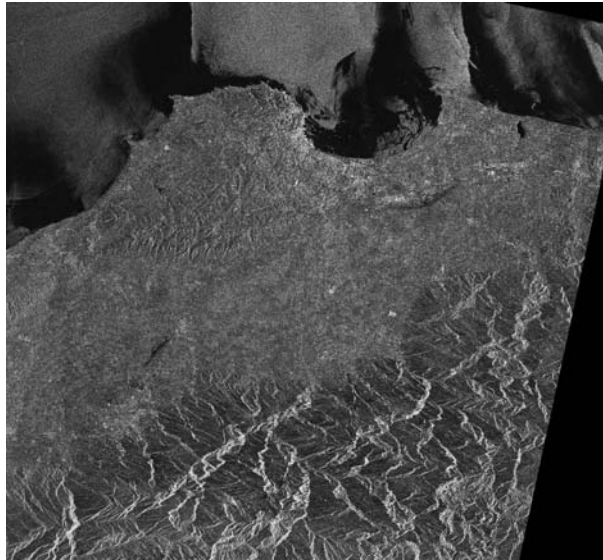
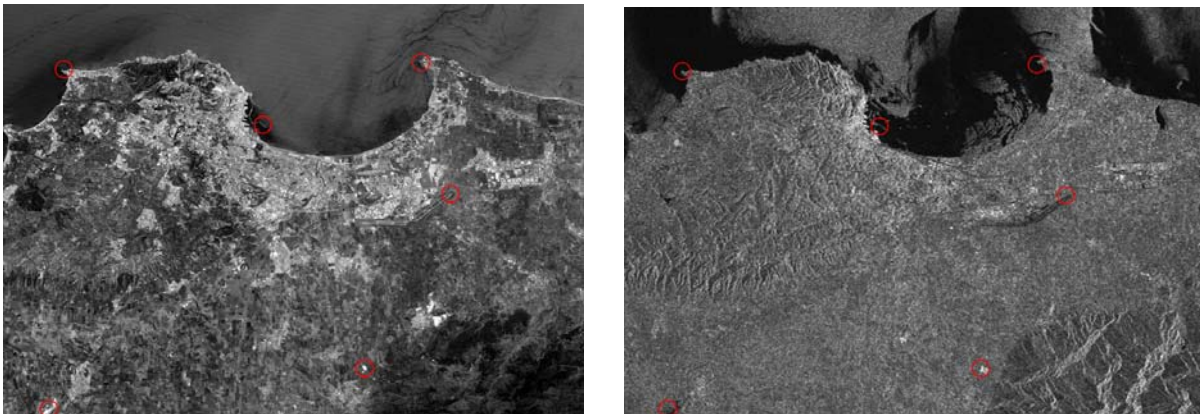


Figure IV.15 : Image corrigée par les déplacements  $X_d$ .

Nos résultats ont été comparés à une image Spot géoreferencée dans le même repère UTM (Figure IV.17), par ailleurs, une comparaison locale des coordonnées géographiques relatives à des objets permanents à partir des cartes et l'image corrigée est effectuée. Cette comparaison montre que le processus de correction géométrique des images radar SLC donne des résultats satisfaisant.



*a*

*b*

Figure IV.17 :. *a* : L'imagerie Spot, *b* : Notre résultat.

Afin de mettre en évidence les corrections de cette dernière étape, c'est-à-dire les distorsions dues aux reliefs, nous avons extrait deux fenêtres de la même région, la première à partir de l'image rectifiée en supposant que le terrain est plat (figure.IV.11) et la deuxième à partir de l'image rectifiée en prenant en compte les distorsions dues aux reliefs (figure IV.15), voir la figure IV.17.

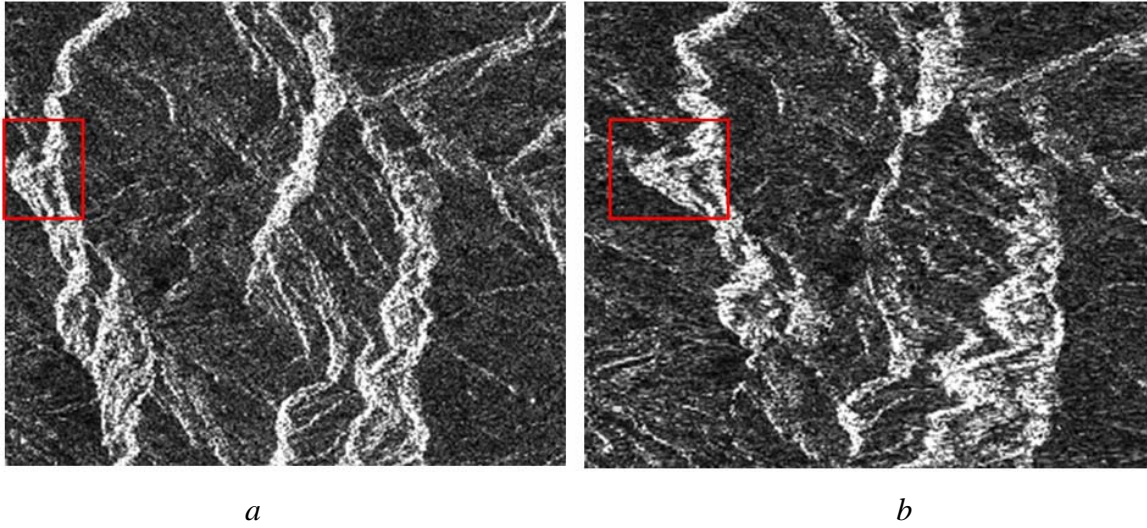


Figure IV.17 : la correction du aux relief. *a* : Le terrain est plat, *b* : Prenant en compte les reliefs.

Une comparaison entre les deux images (*a* et *b*) de la figure IV.16 nous montre que les zones comprimées (zones encadrées en rouge) dans l'image *a* sont dilatées dans l'image *b*.

## Conclusion générale

Toute exploitation et utilisation de l'imagerie radar SAR, sous ses différentes formes (amplitude, intensité et phase) ainsi que les informations dérivées de celles-ci dans divers domaines, nécessitent une phase de correction géométrique afin de faire correspondre, tout pixel de ces images à une cellule (cible) au sol localisée par ses coordonnées géographiques.

Malheureusement, le passages des coordonnées d'un pixel dans la matrice image dont l'origine est arbitraire ((0,0), (1,1)) à des coordonnées géocentriques (X, Y, Z) fait appel à divers procédés liés :

- A la géométrie d'acquisition de l'images radar : l'inclinaison de l'orbite, la visée latérale du capteur, la latitude du satellite sur son orbite, la synthèse d'ouverture, la compression d'impulsion en distance, etc...
- A la géométrie du terrain observé : la pente, l'orientation du relief, l'ombre propre ou porté.
- Aux systèmes de projection à utiliser qui dépendent de la position, sur le globe terrestre, de la surface observée.

Ces différents niveaux de distorsions géométriques rendent la géométrie des images satellitaires, en particulier les images radar SAR, une problématique importante dans toute la chaîne de traitement. Par ailleurs, l'évaluation d'un processus de traitement géométrique est subjective du fait que ses résultats ne sont validés que par leur utilisation ultérieure (identification, reconnaissance des cibles au sol, interférométrie, etc..)

Pour toutes ces raisons nous pouvons dire que le travail que nous avons réalisé n'est qu'une initiation à ce volet de recherche. A cet effet, nous avons étudié les différentes distorsions géométriques dont certaines sont modélisables (déterministes) et d'autres aléatoires. Ensuite nous avons développé un processus de correction géométrique ou le point initial est le satellite (coordonnées géocentriques du satellite, interpolation de l'orbite) et le résultat est la localisation du pixel au sol définie par les coordonnées géographiques selon une projection cartographique.

Nous avons vu premièrement, le processus de formation de l'image radar SAR qui intègre les informations géométriques, radiométriques et les paramètres de prise de vue. Comme nous

l'avons expliqué (chapitre I), en plus des erreurs de localisation de la cible introduites lors de processus de formation d'image radar SAR (l'estimation du centroïde Doppler, les migrations...), la géométrie du terrain (relief) et la spécificité de la visée latérale du radar provoquent aussi une déformation et une délocalisation de la cible.

L'une des étapes les plus importantes dans le processus géométrique est la localisation d'une cible par les trois équations à savoir équation de distance, équation Doppler et l'équation de l'ellipsoïde. Le problème qui s'est posé à nous c'est qu'après résolution du système des trois équations, l'équation Doppler ne vérifie pas les solutions prises comme références. Ce problème reste posé et nous nous sommes pas encore arrivé à le résoudre.

Pour ce là, nous avons développé une méthode globale en utilisant le BEST pour extraire un échantillon de points d'appui.

En suite nous avons effectué une étude sur les systèmes de projection, les transformations entre les systèmes de coordonnées et les systèmes géodésiques et nous avons modélisé les distorsions dues aux pentes (faces à la visée radar) et corrigés les déplacements (délocalisation des cibles due aux reliefs). Nous notons que la modélisation et la correction des effets de basculement et d'ombre restent une problématique posée à l'échelle globale.

Ce processus a été testé sur une image SAR SLC. Les résultats obtenus ont été comparés à une image TM géocodée. Les résultats sont satisfaisants.

En perspectives, nous proposons les points suivants:

- Bien que le processus que nous avons réalisé durant notre travail prend en considération les déformations des images radar, il reste, beaucoup de travaux à réaliser dans cet axe en tenant compte, particulièrement des trois équations de localisation de cible.
- Dans le but de maîtriser la géométrie des images radar SAR SLC, surtout les distorsions dues au relief (compression, basculement, ombre), nous proposons de réaliser un simulateur des images radar SAR SLC. Pour simuler une image SAR nous avons besoin de modéliser, d'une part, l'intensité de la rétrodiffusion radar en géométrie sol et, d'autre part, la position des points dans la géométrie spécifique au radar. Chaque pixel d'une image SAR a une intensité déterminée par celle du signal réémis depuis le sol. La rétrodiffusion d'un point dépend de sa texture et de l'angle avec lequel le signal est réémis. Les forts reliefs caractéristiques des régions de haute montagne induisent la

prédominance de la contribution des effets topographiques (orientation du sol par rapport à la visée radar) par rapport à l'influence de l'occupation des sols.

## Annexe A : Les filtres de rééchantillonnage radiométrique

### 1. Filtre du Plus Proche Voisin (PPV) :

Le principe de ce filtre revient à affecter le niveau de gris du plus proche nœud au plus proche voisin de la valeur (x,y). La radiométrie de point (le nœud) de la grille de l'image corrigée de coordonnées (x,y) prendra une des valeurs vérifiant une des conditions suivantes :

$$I(x, y) = I(dp, dl) = \begin{cases} I(p, l) & \text{si } dp \leq 0.5 \quad \text{et} \quad 0 \leq dl \leq 0.5 \\ I(p+1, l) & \text{si } 0.5 \leq dp \leq 1 \quad \text{et} \quad 0.5 \leq dl \leq 0.5 \\ I(p, l+1) & \text{si } 0 \leq dp \leq 0.5 \quad \text{et} \quad 0.5 \leq dl \leq 1 \\ I(p+1, l+1) & \text{si } 0.5 \leq dp \leq 1 \quad \text{et} \quad 0.5 \leq dl \leq 1 \end{cases}$$

Où :

$$\begin{aligned} dp &= p_n(x, y) - \text{int}(p_n(x, y)) \\ dl &= l_n(x, y) - \text{int}(l_n(x, y)) \end{aligned}$$

Le pixel est alors transféré de la position (p,l) à la position (x,y) et la qualité radiométrique de l'image est ainsi préservée. C'est la méthode la plus rapide en temps de calcul et qui préserve le mieux les données originales, mais elle engendre des effets de marches d'escalier sur les diagonales (introduit des distorsions géométriques sur la localisation au maximum de 0.5 pixel).

### 2. Filtre Bilinéaire :

C'est la méthode qui fait associer (affecter) au point une valeur radiométrique pondérée, calculée à partir des quatre pixels voisins (figur). Il peut avoir une différence entre la valeur radiométrique pondérée et la valeur radiométrique initiale. Donc, de là on peut déduire que cette méthode modifie la radiométrie de l'image [Mich-99].

C'est un filtre de degré 1 obtenu en faisant un développement limité du premier ordre. L'expression de l'intensité bidimensionnelle s'écrit :

$$I(x, y) = h(x, y).I(0,0) + h(x, y-1).I(0,1) + h(x-1, y).I(1,0) + h(x-1, y-1).I(1,1)$$

En pratique, le calcul de I(x,y) revient à faire trois interpolations. L'expression finale de la radiométrie affectée au point de coordonnées (x,y) est la suivante :

$$I(x, y) = I(dp, dl) = (1 - dl).[(1 - dp).I(p, l) + dp.I(p+1, l)] + dl.[(1 - dp).I(p, l+1) + dp.I(p+1, l+1)]$$

Ce filtre, moins rapide, permet d'éviter les distorsions géométriques générées par le filtre PPV. La précision spatiale est cependant plus satisfaisante. Par contre, il introduit des erreurs radiométriques dues au calcul des valeurs moyennes.

### 3. Filtre Bicubique :

Ce filtre, appelé aussi filtre de convolution cubique, est obtenu en faisant une modélisation polynomiale sur un intervalle borné. La valeur de l'intensité au point  $x$  est calculée en prenant un voisinage de 4 points [Mich-99]:

$$I(x) = \sum_{i=-1}^2 h(x-i).I(i)$$

Dans le cas bidimensionnel, l'intensité en tout point est obtenue en prenant un voisinage de 16 pixels :

$$I(x, y) = \sum_{i=-1}^2 \sum_{j=-1}^2 h(x-i, y-j).I(i, j)$$

En pratique, l'intensité au point  $(dp, dl)$  consiste à faire 5 interpolations :

$$\begin{aligned} 1. \quad I(dp, l-1) &= I(dp, l-1) + dl[I(p+1, l-1) - I(p-1, l-1)] \\ &+ d^2 p[2I(p-1, l-1) - 2I(p, l-1) + I(p+1, l-1) - I(p+2, l-1)] \\ &+ d^3 p[I(p+2, l-1) - I(p+1, l-1) + I(p, l-1) - I(p-1, l-1)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \quad I(dp, l) &= I(dp, l) + dl[I(p+1, l) - I(p-1, l)] \\ &+ d^2 p[2I(p-1, l) - 2I(p, l) + I(p+1, l) - I(p+2, l)] \\ &+ d^3 p[I(p+2, l) - I(p+1, l) + I(p, l) - I(p-1, l)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \quad I(dp, l+1) &= I(dp, l+1) + dl[I(p+1, l+1) - I(p-1, l+1)] \\ &+ d^2 p[2I(p-1, l+1) - 2I(p, l+1) + I(p+1, l+1) - I(p+2, l+1)] \\ &+ d^3 p[I(p+2, l+1) - I(p+1, l+1) + I(p, l+1) - I(p-1, l+1)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4. \quad I(dp, l+2) &= I(dp, l+2) + dl[I(p+1, l+2) - I(p-1, l+2)] \\ &+ d^2 p[2I(p-1, l+2) - 2I(p, l+2) + I(p+1, l+2) - I(p+2, l+2)] \\ &+ d^3 p[I(p+2, l+2) - I(p+1, l+2) + I(p, l+2) - I(p-1, l+2)] \end{aligned}$$

Finalement, l'intensité au point  $(dp, dl)$  s'écrit alors :

$$\begin{aligned} I(dp, dl) &= I(dp, l) + dl[I(p+1, l+1) - I(dp, l+2)] \\ &+ d^2 l[2I(2p, l-1) - 2I(dp, l) + I(dp, l+1) - I(dp+1, l+2)] \\ &+ d^3 l[I(dp, l+2) - I(dp, l+1) + I(dp, l) - I(dp, l-1)] \end{aligned}$$

Ce filtre, lent, engendre un important effet de lissage. Mais, il est le plus adapté pour les corrections géométriques du fait de sa très grande précision spatiale.

## Annexe B : Les différents produits de ERS.

### 1. Les niveaux standard de prétraitement des images RSO

Les données RSO sont fournies par des agences spatiales ou les fournisseurs d'images satellitaires sous un format traditionnel en imagerie satellitaire : Le format CEOS1 qui inclut les données " image " et les données auxiliaires selon le type de produit et les spécifications demandées. Plusieurs catégories de données existent avec des niveaux de prétraitement différents et sont destinées à des applications variées. Le plus bas niveau de la gamme est le signal brut et le plus sophistiqué est une image dans laquelle les distorsions géométriques liées au relief ont été corrigées.

#### 1.1 Les différentes catégories de données RSO :

- **Les données brutes**

Il s'agit d'un signal bidimensionnel dont les directions d'échantillonnage sont physiquement liées au capteur. Ce type de données est proposé en vue de permettre la réalisation des traitements de synthèse RSO spécifiques. Le signal brut ERS est codé sur 10 bits dont 5 bits pour le canal  $i$  et 5 bits pour le canal  $q$ , où respectivement  $i$ ,  $q$  signifient (In phase) et (Quadrature) ;  $i$  représente donc en notation complexe la partie réelle du signal et  $q$  la partie imaginaire. Ce signal comprend 5616 échantillons en distance et 27000 échantillons en azimut soit un volume de données supérieur à 300 Mo pour une superficie de  $100\text{km} \times 110 \text{ km}$ .

- **Les données mono-vues complexes**

C'est une image complexe, en projection « distance-azimut », elle est obtenue directement après le traitement de synthèse d'ouverture. Ce type de données monovues est aussi appelé SLC. A ce stade, la dimension d'un pixel ne dépend que de deux paramètres :

1. La Fréquence de Répétition des Impulsions (FRI) en azimut, la taille du pixel est une fonction de la vitesse du satellite  $V_s$ . Elle est donnée par la formule :

$$\Delta\delta_a = \frac{V_{st}}{F_{PRF}}$$

2. La fréquence d'échantillonnage en distance  $F_e$ , la taille du pixel en distance dépend de l'angle d'incidence  $i$  de l'onde, sa valeur sur sol plat est donnée par :

$$\Delta\delta_r = \frac{c}{2F_e \sin(i)}$$

Nous donnons à titre d'exemple les résolutions radiale et azimutale des satellites radar européens ERS1, ERS2, ASAR dans le tableau ci-dessous.

|        | $F_e$        | $F_{PRF}$  | $V_{St}$   | $i$ au centre | $\Delta\delta_a$ | $\Delta\delta_r$ |
|--------|--------------|------------|------------|---------------|------------------|------------------|
| ERS1/2 | 18.962468MHz | 1679.902Hz | 7552.18m/s | 23.254°       | 4.24m            | 20.02m           |

|      |              |            |            |        |       |        |
|------|--------------|------------|------------|--------|-------|--------|
| ASAR | 19.207680MHz | 1652.415Hz | 7555.67m/s | 23.00° | 4.25m | 19.97m |
|------|--------------|------------|------------|--------|-------|--------|

L'intérêt majeur de ce type de données est la richesse d'une grandeur complexe, dont l'amplitude peut être visualisée comme une image et la phase utilisée dans des techniques d'interférométrie. Ce type d'image est très marqué par le chatoiement (speckle) et les caractéristiques géométriques du pixel; rectangulaire ( $5 \times 20$  m), fortement allongées en distance rendent l'interprétation visuelle délicate. Dans le cas des données satellitaires, les images SLC sont fournies en valeurs entières. Elles sont codées sur 32 bits par pixel (16 bits pour la partie réelle, 16 bits pour la partie imaginaire). Ce signal comprend environ 4900 échantillons et 26000 lignes pour une scène entière  $100km \times 100km$ , soit un volume de données de 520 Mo. Les données multivues. C'est une image détectée en amplitude facilement interprétable et telle que le pixel soit carré et ramené à la géométrie sol. Pour obtenir ce type d'images deux étapes majeures sont nécessaires :

1. Un filtrage azimutal tel que l'on puisse observer une diminution du chatoiement par une moyenne de plusieurs sous-images, cette étape permet d'effectuer un sous-échantillonnage.
2. Une étape de sur-échantillonnage en distance, prenant en compte la variation le long de la fauchée de l'angle d'incidence.

Les données ne sont plus sous forme complexe, mais en amplitude. Etant donné la dynamique des images RSO, elles sont codées en entiers sur 16 bits. Une scène ERS contient environ 8000 pixels de 12,5 m en distance et 8200 pixels de 12,5 m en azimut, soit un volume d'environ 130 Mo. C'est le niveau de traitement le plus couramment utilisé, le speckle est réduit d'un facteur de  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  dans le cas d'une image ERS-PRI par rapport au produit SLC.

- **Les produits dérivés**

Ils correspondent à des images géoréférencées, orientées Nord-Sud, l'ESA2 propose :

1. Le niveau *GEC* : (Ellipsoïd Geocoded Image) correspondant à une image RSO, recalée sur l'ellipsoïde WGS 1984 et représentée dans un système de projection cartographique UTM (latitudes entre  $-70^\circ$  et  $70^\circ$ ) ou UPS ailleurs. Les pixels sont des carrés de 12,5m codés sur 16 bits. En fonction de la transformation appliquée à l'image, le nombre de pixels varie entre 9100 et 12000 en ligne et en colonne.
2. Le niveau *GTC* : (Terrain Geocoded Image), correspondant à une image géocodée et corrigée des effets de relief, dans la mesure où un modèle numérique de terrain (MNT) ayant une précision suffisante existe.

## **Annexe C : Datum (système géodésique) :**

Pour définir la position d'un lieu, il ne suffit pas de donner ses coordonnées E et N, ni sa latitude et sa longitude, ni de dessiner un point sur une carte quelconque ; Il faut aussi que soient précisés les modèles, les projections, les systèmes de coordonnées utilisés. Un datum (ou système géodésique) c'est un jeu cohérent de tout ces paramètres. Il pourra comprendre :

- Un ellipsoïde de référence.
- Un géoïde (qui sert souvent seulement de référence pour les altitudes).
- Un système de projection pour les cartes.
- Un système de coordonnées.
- Des principes de calcul, y compris les approximations à faire.

### **WGS84 :**

- Ellipsoïde de référence : GRS80 ou WGS84 (très proches, moins d'un mm de différence)  
grand axe : 6 378 137.000 m, petit axe : 6 356 752.314 m.
- Géoïde, utilisé pour les altitudes : WGS-84 Geoid Heights, défini par pas de 0.25 degrés par la NIMA (US National Imagery and Mapping Agency)
- Coordonnées géographiques : en degrés, méridien de référence : Greenwich
- Projections et coordonnées associées :
  1. UTM (Universal Transvers Mercator) entre les latitudes 80° sud et 84° nord.
  2. UPS (Universal Polar Stereographic) pour les pôles.

### **ED50 :**

- Ellipsoïde de référence : International 1924 (Hayford 1909) grand axe : 6 378 388.000m, petit axe : 6 356 911.946 m.
- Somme des observations nationales européennes. Point fondamental : Helmert Tower à Postdam.
- Coordonnées géographiques : en degrés, méridien de référence : Greenwich
- Projection et coordonnées associées : UTM

### **NTF :**

- Ellipsoïde de référence : Clarke 1880 IGN grand axe : 6 378 249.200 m, petit axe : 6 356 515.000 m.
- Triangulation de l'IGN, point fondamental : Panthéon à Paris.
- Niveau de référence des altitudes : niveau moyen de la mer à Marseille
- Coordonnées géographiques : en grades, méridien de référence : Paris
- Projections et coordonnées associées : Projections coniques conformes Lambert.

## References

- [1] T.BAYER, R.WINTER, G.SCHREIER. Investigation of slope and aspect effects on image grey values in geocoded SAR image. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, Volume 2, Issue, 10-14 Jul 1989, pp: 454-457.
- [2] C.HENRY. Détection de points brillants par corrélation complexe entre sous-vues d'une image RSO spatiale. Docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse Ecole Doctorale : Informatique et Télécommunications. Spécialité : Signal, Image et Acoustique. 15 décembre 2003, 163p.
- [3] C.TISON. Interférométrie RSO à Haute Résolution en Milieu Urbain Application au Calcul de MNS Urbain. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications. Novembre 2004, 252p.
- [4] Y.CHIBANI. 1993. Implémentation d'un processus de correction géométrique d'images satellitaires. Rectification Carte-Image. Thèse de magister, USTHB 1993, 107p.
- [5] C.PRATI, F.ROCCA. Focusing SAR Data with Time-Varying Doppler Centroid. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, vol.29 no.3.May 1992, pp: 550-559.
- [6] C.OLMSTED. Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide. Senior Programmer/Analyst July 1993, 57p
- [7] D.PETI. Extraction du « 3D » par Interférométrie Radar à Haute Résolution. Thèse de doctorat. Université Toulouse III. Janvier 2004, 210p.
- [8] D.SMALL, F.HOLECZ, D.NIIESCH. Combination of Ascending/ Descending ERS-I INSAR Data for Calibration and Validation. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1995, pp: 553-555.
- [9] E.SIMONETTO. Extraction 3-D de Structures Industrielles Sur des Images Ramses Haute Résolution Par Radargrammetrie. Docteur de L'Université de Rennes1. avril 2002, 222p.
- [10] E.HUOT. Etude de l'Evolution Temporelle de Phénomènes Terrestres au Moyen de l'Imagerie Radar. Thèse de doctorat. Université de CAEN / Basse-Normandie. Janvier 2000, 235p.

- [11] Franz W.LEBERL. Radargrammetric Image Processing. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1990, 595p.
- [12] G.FRANCESCHETTI, R.LANARI. Synthetic Aperture Radar Processing. CRC PRESS, New York, 1999, 338p.
- [13] H.TREBOSEN. Apport des Images Radar à Synthèse d'Ouverture à la Cartographie Marine. Thèse de doctorat. Université de Marne la Vallee. 2002, 172p
- [14] G.M.HUANG, J.K.GUO, Z.ZHAO, Z.XIAO, C.P.QIU, L.PANG, Z.Y.WANG. DEM Generation from Stereo SAR Images Based on Polynomial Rectification and Height Displacement. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, pp: 4227-4230.
- [15] G.M.HUANG, J.K.GUO, J.G.LV, Z.XIAO, Z.ZHAO, C.P.QIU. Algorithms And Experiment On SAR Image Orthorectification Based On Polynomial Rectification And Height Displacement Correction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX, 2003, 5p.
- [16] John C.CURLANDER, Benjamin Holt, Kevin J. Hussey. Determination of Sea Ice Motion Using Digital SAR Imagery. IEEE Journal of Oceanic Engineering, VOL. OE-10, NO. 4, 1985, pp: 358-367.
- [17] JOHN C.CURLANDER, ROBERT N.MCDONOUGH. Synthetic Aperture Radar- Systems and Signal Processing. John Wiley & Sons, New York, 1991, 676p.
- [18] J.WANG, X.LIU. SAR Automatic Range-Migration Correction. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, pp: 3926-3929.
- [19] k.REN, V.PRINET, XIANGQUAN, Shi G.WU. Simulation of Interferogram Image For Spaceborne SAR System. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, Vol.29, NO.3, 2003, pp: 451-462.
- [20] Kwang-Yong.KIM, S.JEONG, Kyung-Ok.KIM. Implementation of a SAR Image Mapping Module Using the OGC Grid Coverage. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, pp: 4231-4234.
- [21] L.BASLY. Télédétection Pour la Qualité de l'Air en Milieu Urbain. Thèse de doctorat. Université de Nice. novembre 2000, 194p.

- [22] L.NOCERA. Reconstruction du relief en Imagerie Radar à Ouverture de synthèse : Stéréoscopie et Ombrages. L'université de Paris 7 Jussieu, Thèse de doctorat. Mai 1996, 193p.
- [23] Man-Jo.KIM. An Efficient Rectification Algorithm for Spaceborne SAR Imagery Using Polynomial Model. Agency for Defence Development Korean Journal of Remote Sensing, Vol.19, N<sup>o</sup>.5, 2003 p: 363-370.
- [24] Michel-Claude Girard, Colette-Marie Girard. Traitement des données de télédétection. Dunod, 1999, 552p.
- [25] E.MEIER, Ch.GRAF, D.NUESCH. Generation of Geocoded Spaceborne SAR Image Products. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, Vol: 4, pp: 2473-2477, 1989.
- [26] Mr BELHADJ AISSA Mostefa. Conception d'un Système d'Information Géographique orienté objet mise en œuvre d'une application aux risques de feux de forêt. Thèse de doctorat. Faculté d'Electronique et d'Informatique, USTHB, 2004, 175p.
- [27] A.ROTH, T.HIIGEL, D.KOSMANN, M.MATSCHKE, G.SCHREIER. Experiences With ERS-1 SAR Geopositional Accuracy. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1993, pp: 1450-1452.
- [28] A.ROTH, D.KOSMANN, M.MATSCHKE, B.MUSCHEN, H.JOHN. Experiences in Multi-Sensoral SAR Geocoding. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1996, pp: 2338–2340.
- [29] A.ROTH, H.CRAUBNER, Th.BAYER. Prototype SAR Geocoding Algorithms for ERS-1 and SIR-C/X-SAR Image. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1989 pp: 604–607.
- [30] G.SCHREIER. SAR geocoding: data and systems. Karlsruhe:Wichmann Verlag, 1993.
- [31] G.SCHREIER, J.RAGGAM, D.STROBL. Parameters for Geometric Fidelity of Geocoded SAR Products. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1990, pp:305-308.
- [32] S.PAQUERAULT. Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie. Thèse de doctorat. Universite Telecom Paris Département TSI. Avril 1998, 188p.

- [33] S.GUILLASO. Complémentarité Polarimétrie /Interférométrie Pour la Détection et la caractérisation de Cibles. L'université de RENNES 1. These de doctorat. Novembre 2003, 134p.
- [34] V.AMBERG. Analyse de Scènes Péri-urbaines à Partir D'images Radar Haute Résolution. Thèse de doctorat. L'Institut National Polytechnique de Toulouse, novembre 2005, 131p.
- [35] Y.SMARA. Contribution au Système d'Analyse et de Traitement d'Images Satellitaires L.A.T.I.S. Evaluation de Correspondance Terrain-Image Classifiée et Intégration d'Images Multisources Optiques et radar S.A.R. Thèse de doctorat. Faculté d'Electronique et d'Informatique, USTHB, 1998, 321p.
- [36] S.ZINE. Contribution de la Télédétection Satellitale Radar Pour le Suivi des Paramètres de Surface d'une Zone Sahélienne Agro-pastorale. Thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée Spécialité : Sciences de l'information géographique, 2005, 163p.