



**Interférométrie radar différentielle  
Application à la détection  
des mouvements de terrain  
(Synthèse bibliographique)**

---

juin 1993  
R 37331

UNIVERSITE PARIS VII

UFR DE PHYSIQUE

Spécialité  
Méthodes Physiques en Télédétection

Sujet de thèse :

**INTERFEROMETRIE SAR DIFFERENTIELLE - APPLICATION A LA  
DETECTION DE MOUVEMENTS DE TERRAIN**

Synthèse bibliographique

BRGM - Département Télédétection

CLAUDIE CARNEC

06/1993

## RESUME

L'objet principal de cette étude est une présentation des techniques interférométriques radar. L'analyse des différences de phase permet d'espérer la détection et l'évaluation de variations altimétriques de terrain. L'interférométrie différentielle pourrait être un moyen puissant de détection et suivi sur des bases de temps courtes (notamment à partir de cycles orbitaux courts du type des orbites de 3 jours d'ERS1) et offrir une possibilité de mesure des mouvements de très faible amplitude (de l'ordre du millimètre). Elle promet de fournir des informations précieuses dans plusieurs domaines des sciences de la Terre (activité d'un rift le long d'une faille, effondrement de site d'exploitation minière, glissement de terrain, dérive des glaciers,...).

Cependant, l'interférométrie souffre de limites théoriques sévères dans sa mise en oeuvre. Une analyse des contraintes et limites d'application de la technique est développée parallèlement à la présentation théorique et aux résultats expérimentaux acquis en interférométrie. Nous distinguerons les contraintes liées à l'acquisition des données (couverture radar, cycles orbitaux, parallélisme des orbites, baseline), aux caractéristiques de l'imagerie radar (bruit thermique, speckle, longueur d'onde), à la spécificité du produit interférométrique (nécessité de "dérouler" les valeurs de phase connues modulo  $2\pi$ ), à la décorrélation entre échos radar (décorrélation spatiale, thermique et temporelle), et enfin aux caractéristiques morphologiques des terrains imagés (effets de pente, de layover, d'ombre).

Les possibilités à explorer et à développer restent néanmoins très prometteuses et l'enthousiasme qu'elles provoquent se justifie par la qualité des premiers résultats obtenus.

## SOMMAIRE

### Résumé

### Sommaire

### Avant-propos

### Chapitre 1

#### *I - Télédétection radar*

##### I.1 Introduction

##### I.2 Evolution récente

##### I.3 Particularités et spécificité du radar

##### I.3.1 Acquisition de l'information

##### I.3.2 Longueur d'onde radar

##### I.3.3 Speckle

##### I.3.4 Déformations géométriques

##### I.4 Un satellite nouvelle génération : ERS-1

##### I.4.1 L'innovation

##### I.4.2 Orbitographie

#### *II - Radar à synthèse d'ouverture (SAR) - Applications Géologiques et Topographiques*

##### II.1 Spécificité de l'information radar dans le domaine géologique

##### II.2 Une nouvelle interprétation de l'imagerie spatiale

##### II.3 Perspectives d'analyse géologique multi-source en télédétection.

##### II.4 Utilisation du SAR en cartographie du relief

### Chapitre 2 : Interférométrie radar

#### *I - Introduction*

##### I.1 Représentation complexe de l'onde

##### I.2 Utilisation de la phase en télédétection radar

#### *II - L'interférométrie*

##### II.1 Introduction : les enjeux

##### II.2 Principe - théorie

##### II.2.1 Interférométrie SAR satellitaire

##### II.2.2 Interférométrie SAR aéroportée

##### II.2.3 Evaluation de l'erreur altimétrique

##### II.3 Déroulement de phase

#### *III - Limites-Contraintes d'application*

##### III.1 Limites instrumentales

##### III.1.1 Positionnement de la plate-forme

##### III.1.2 Baseline

##### III.2 autres contraintes

***IV - Evaluation du degré de cohérence du produit interférométrique***

IV.1 Introduction

IV.2 Identification des différentes sources de décorrélation

IV.3 Evaluation des contributions respectives : les acquis expérimentaux

***V - Résultats obtenus et perspectives***

V.1 Précision altimétrique

V.2 Evolution - Perspectives

V.2.1 Rappel historique

V.2.2 Interférométrie aéroportée

V.2.3 Interférométrie satellitaire

***VI - Autres techniques interférométriques***

VI.1 Interférométrie à balayage le long de la trace

VI.2 Tethered interferometry

**Chapitre 3 :**

**Interférométrie différentielle : de nouvelles directions de recherche...**

***1.1 Principe***

***1.2 Potentialités***

***1.3 Applications à la détection de mouvements de terrain***

**ANNEXES**

**Bibliographie thématique**

## Avant propos

Le BRGM a engagé depuis plusieurs années des programmes de recherche sur les risques naturels, et en particulier sur les mouvements de terrain. L'enjeu est de limiter les dommages liés aux mouvements de terrain en comprenant mieux les phénomènes responsables, de les surveiller et de faire connaître les acquis et les méthodes de suivi et de diagnostic les plus adaptés. Tester les techniques de télédétection pour répondre à ces préoccupations fait partie des missions du département de télédétection et a déjà fait l'objet d'un programme SPOT Aval, avec les possibilités stéréoscopiques de SPOT.

Les perspectives esquissées actuellement avec l'interférométrie sont d'un grand intérêt pour le BRGM et s'intègrent parfaitement dans le cadre de ces études. Cependant, il est encore trop tôt pour cerner les limites de validité opérationnelle de cette technique. L'intérêt de l'étude réside dans l'acquisition de connaissances sur les limites de détectabilité des mouvements de terrain par une technique nouvelle, l'interférométrie différentielle, et dans la perspective de mise au point d'une méthode de surveillance des zones à risques, qui soit complémentaire des méthodes conventionnelles.

L'étude proposée s'inscrit dans le cadre des projets de recherche du BRGM centré sur les thèmes G3 "Géologie-Evolution" et G5 "Géologie-Interférométrie" de l'appel d'offre du comité GATT/CNES. L'encadrement est assuré par J.P. Villain (CNRS-LPCE) et C. King (BRGM-TED). La thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe de D. Massonnet (CNES-CST).

## CHAPITRE 1

### I - TELEDETECTION RADAR

#### I.1 - Introduction

Des besoins aussi variés que l'évaluation des ressources, l'exploration, la prévention des risques naturels et l'aménagement nécessitent des moyens d'observation que les outils traditionnels d'acquisition de l'information sur les ressources terrestres (essentiellement aériens et sondages) ne peuvent satisfaire. Vouloir en effet disposer fréquemment de données récentes, fiables et homogènes, sur des territoires immenses, voire sur l'ensemble de la planète, requiert des moyens d'investigations d'autant plus puissants qu'il s'agit de prendre des décisions rapides. A ces fins, la télédétection spatiale constitue un outil supplémentaire et innovateur, en offrant une couverture plus large des lieux à observer et en imageant des terrains par ailleurs inaccessibles dans des périodes de temps relativement brèves (cycles de répétitivité d'enregistrement d'une même zone de 3 ou 35 jours pour ERS-1).

Cependant, l'observation optique est difficilement exploitable dans des régions ou en des saisons caractérisées par une forte couverture nuageuse ou une incidence solaire rasante. Dans de telles circonstances, les capteurs actifs hyperfréquences (RADAR/Radio Detection and Ranging) et en particulier le SAR (Synthetic Aperture RADAR), fournissent un moyen à peu près unique d'acquérir des images de la Terre depuis l'espace, en bénéficiant d'une fenêtre spectrale de transmission atmosphérique, c'est-à-dire une région du spectre électromagnétique pour laquelle l'atmosphère terrestre est quasi-transparente et permet l'observation de la surface terrestre (fréquences comprises entre 0.1 et 15 GHz) [fig.I.11 et I.12].

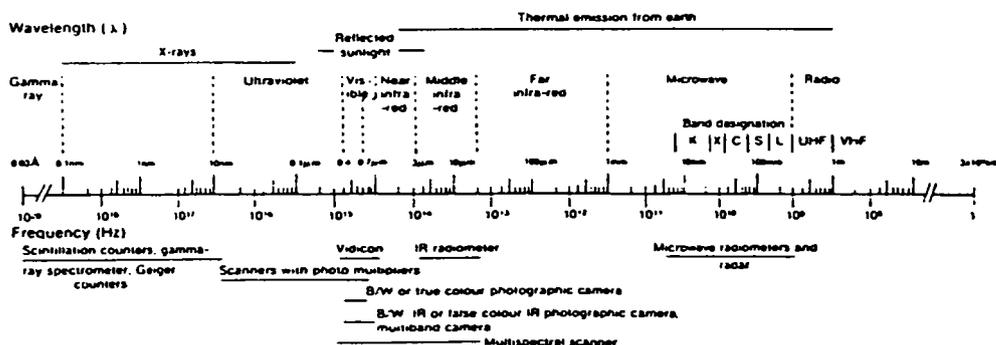
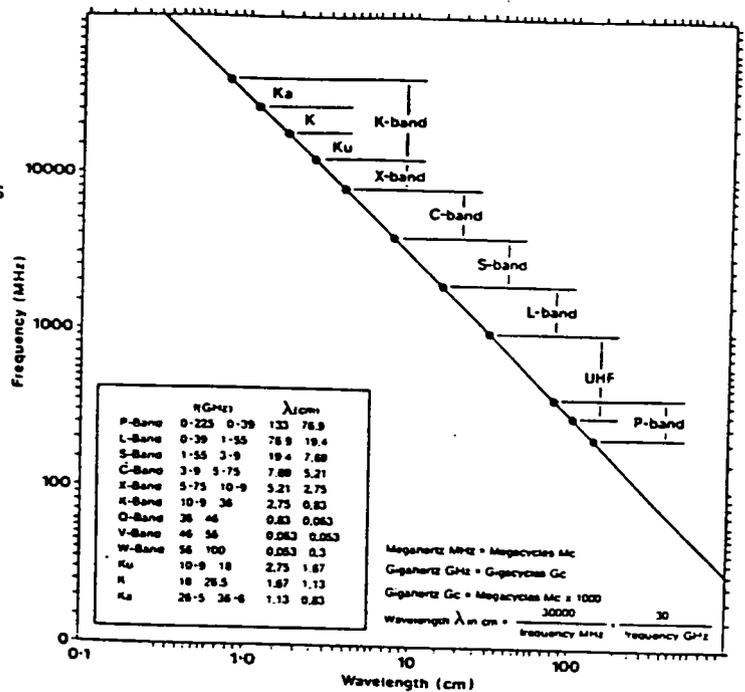


fig I.1.1 - Spectre électromagnétique [Trevett - 1986]

fig I.1.2 - Spectre des Hyperfréquences  
(La codification est légèrement différente en fonction des nomenclatures utilisées et les limites varient sensiblement selon les auteurs)



## I.2 - Evolution récente

Après les premières missions SAR spatiales des années 80 (SEASAT, SIR-A, SIR-B), la décennie 90 s'avère être la décennie de la télédétection radar. Les programmes européen et japonais (ERS-1, European Remote-Sensing Satellite, JERS-1, Japanese Earth Resources Satellite) ont marqué le début d'une ère nouvelle dans les procédures d'acquisition de données.

D'autres programmes sont actuellement en cours de réalisation et devrait assurer la pérennité des programmes SAR spatiaux : RADARSAT (Canada) et ERS-2 (lancements prévus pour 1994), planification des missions SIR-C et du projet EOS-SAR (Earth Observing System), ce dernier étant prévu pour la fin des années 90. Les grandes plateformes multi-missions en orbite polaire assureront la continuité à long terme des observations [fig I.21]. A ce programme spatial ambitieux, il faut ajouter les nombreuses campagnes radar aéroportées mises en oeuvre, entre autres, par le Canada (CCRS, Intera), les USA (JPL, NASA, ERIM), l'Europe (JRC, EARSEC), l'Allemagne (DLR) et la France (CNES, ONERA). Citons, à titre d'exemple, le programme canadien Globesar-93 dont l'objectif est de fournir les outils nécessaires à l'utilisation de données radar et de préparer les utilisateurs expérimentés aux systèmes radar aéroportés/spatiaux présents et futurs, notamment à travers des programmes de recherche relatifs aux applications interférométriques et polarimétriques.

Les récents progrès technologiques concernent les nouveaux capteurs offrant une variété d'angles d'incidence, de longueurs d'onde et de polarisations. Ils concernent les techniques de calibration, interférométrie, mesure géophysique, analyse multi-fréquence, polarimétrie, positionnement/corrections terrain, analyse multi-capteurs, et les études comparatives simulation/terrain.

Au stade actuel des recherches bibliographiques sur les spécificités de l'imagerie radar et de ses applications (spécialement en interférométrie), l'article suivant se veut être simplement un exposé synthétique mais non exhaustif destiné à faire connaître l'outil radar tel qu'il est utilisé en télédétection. Nous nous attacherons seulement à exposer les principales originalités et potentialités de ce capteur indispensables à la compréhension de l'étude interférométrique envisagée ici. Enfin, l'instrument ERS1-SAR sera brièvement présenté dans la mesure où notre étude repose sur les données issues de ce capteur.

	ERS-1	SIR-C/X-SAR	JERS-1	RADARSAT	EOS SAR	ALMAZ 1.2
Spectral Coverage	C	L,C,X	L	C	L,C,X	S
Polarization	VV	Quad (C, L) VV (X)	HH	HH	Quad (L) Dual (C,X)	HH
Look Angle (°)	23	15-60	35	20-50	15-40	30-60
Resolution (m)	30	25	30	10-100	20-250	15-30
Swath Coverage (km)	100	10-150	80	50/500	30-500	20
Orbit Altitude (km)	800	215	568	792	620	300
Orbit Inclination (°)	98	57	98	98.6	98	73
Launch Date	1991	1993 1994 1996	1992	1994	1999	1990

fig I.21 - Prochaines missions SAR-spatiaux programmées

### I.3 - Spécificité et particularités du radar.

A première vue, les images des radars à synthèse d'ouverture (SAR) ressemblent fortement aux images des appareils de prise de vue classiques ou à celles d'un scanneur multispectral. Mais un examen plus attentif révèle des différences fondamentales entre l'information fournie par les capteurs proche infra-rouge/visible (LANDSAT ou SPOT) et celle du radar, et requiert des techniques d'interprétation d'image différentes, les caractéristiques de la diffusion micro-onde des éléments de surface étant largement décorréliées de la réflectivité optique.

#### I.3.1 Acquisition de l'information.

Les images radar sont caractérisées par de très grandes variations des niveaux de gris entre les secteurs à rétrodiffusion élevée et les secteurs à rétrodiffusion plus faible. C'est pourquoi elles sont souvent enregistrées numériquement en format de 16 bits, soit 65 536 niveaux de gris, alors que la plupart des images dans le domaine optique du spectre se contentent de 8 bits ou 256 niveaux de gris.

Il existe une différence importante entre les radars dits à antenne réelle et ceux à antenne synthétique. Dans le cas des radars à antenne réelle, l'image du sol est simplement obtenue par une représentation optique de l'énergie des échos reçus au cours du temps et reproduit comme une ligne de l'image. Pour l'antenne synthétique, le signal émis est composé d'impulsions successives. Chaque cible produira un grand nombre d'impulsions retour à intervalles réguliers, le long de la ligne de vol. Pour obtenir une information Doppler sans aucune ambiguïté, l'ensemble des échos retour est enregistré pour chaque cible en tenant compte de leur module et de leur phase. La combinaison de ces échos est telle que l'antenne synthétique puisse simuler une antenne physique de même longueur.

Dans le cas du SAR, le traitement des signaux devient plus complexe car non seulement leur amplitude mais aussi leur phase doivent être prises en compte. Cette considération est essentielle puisqu'elle est à l'origine de l'interférométrie [chapitre II].

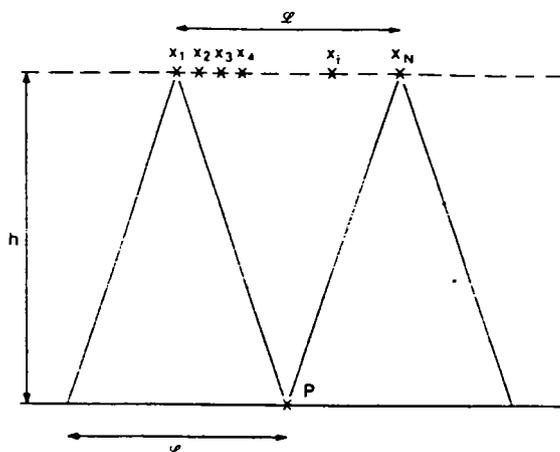


fig I.3.1 Géométrie d'une antenne à synthèse d'ouverture [Elachi 1988].

Le point P est visible des positions  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . La longueur de l'antenne synthétique est égale à l'empreinte de l'antenne réelle L.

### 1.3.2 Longueur d'onde radar.

Les interactions d'ondes radar avec la surface terrestre sont principalement influencées par les caractéristiques physiques (pente, morphologie, rugosité, hétérogénéité) et électriques (constante diélectrique, absorption, conductivité) de cette surface, de la proche subsurface et du couvert. Outre leur fonctionnement actif qui différencie les radars des autres capteurs traditionnels, l'écart de longueur d'onde radar et visible/PIR (d'un facteur  $10^5$ ) signifie que les capteurs répondront à des tailles différentes de diffuseurs. Le choix de longueur d'onde s'effectue selon des critères relatifs à l'existence de fenêtres atmosphériques, de bandes de fréquences permises -sans danger d'interférence avec des bandes de transmission essentielles- et selon les paramètres physiques et électriques énumérés ci-dessus, en fonction de l'étude envisagée. Par exemple, la longueur d'onde utilisée affectera la réflectivité de la cible, essentiellement caractérisée par sa constante diélectrique (et donc le pouvoir de pénétration qui en résulte), ainsi que la représentation de la rugosité (définie par le critère de Rayleigh) ; les courtes longueurs d'ondes donnent généralement un effet de rugosité plus prononcé et fournissent, en présence de forts reliefs, des images trop brillantes, ininterprétables (on utiliserait plutôt des hautes fréquences -bandes S ou L [fig I.12]- pour de faibles reliefs).

### 1.3.3 Speckle.

La nature cohérente des ondes radar fait que l'intensité du signal retour varie selon que les centres diffuseurs s'ajoutent en phase ou en opposition de phase, créant l'effet de "speckle" ou bruit de scintillement. L'image radar est en fait multipliée par une variation d'intensité spatiale dont les propriétés statistiques ont été estimées [Lopes 1990-Laur 1989]. Ce bruit d'image, caractéristique des images cohérentes, signifie que la puissance radar restituée par un élément de résolution individuel est sujette à une incertitude statistique, au-delà de celle causée par le bruit du récepteur. Il est attribuable au fait que les irrégularités de la scène visée sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde d'éclairage. Le speckle est un bruit multiplicatif, c'est à dire qu'il augmente avec la valeur du signal reçu au capteur.

### 1.3.4 Déformations géométriques.

Quant au système de coordonnées distance/azimut des images radar, il crée des déformations géométriques que l'on doit différencier des déformations angulaires rencontrées en photographie ou avec des capteurs multispectraux. Le système de prise

de vue oblique provoque des artefacts et induit des difficultés de repérage, notamment en zone montagneuse. Par exemple, les structures situées parallèlement au faisceau ne seront pas détectées, les versants non éclairés apparaîtront en zone d'ombre, et ceux au contraire trop éclairés accumuleront une énergie masquant leurs détails.

Cependant, la grande qualité d'information enregistrée et les performances de prise de vue liées implicitement à la nature des vecteurs d'information du capteur, font des radars latéraux des systèmes de télédétections privilégiés.

Parmi les déformations occasionnées, celles introduites par le relief des zones survolées créent des ambiguïtés auxquelles nous sommes appelés à être confrontés, particulièrement dans le cas de sites d'étude alpins. Le signal radar étant caractérisé par la différence de trajet aller-retour des ondes électromagnétiques, dans le cas de relief très prononcé, le sommet, plus proche du capteur, peut se trouver imagé avant le fond des vallées. Cet effet, appelé "layover", est illustré [fig 1.3.4.a]. La pente AB apparaît rétrécie alors que BC, opposée à la direction d'éclairage, semble plus allongée sur l'image SAR. L'effet général est un "déversement" vers le capteur du relief ABC. Quant à "l'effet d'ombre" [fig 1.3.4.b], il se traduit par une absence totale de données d'une pente masquée par un relief. Contrairement à l'imagerie visible SPOT ou LANDSAT qui ne représente pas les parties cachées, le radar les représente, mais en noir car elles ne renvoient aucun signal. Ces distortions provoquent des difficultés précisément dans l'interprétation de formations géologiques à partir d'images radar. Si la topographie exprime des traits géologiques dans des reliefs relativement modérés, l'effet d'ombre peut s'avérer d'une aide précieuse pour le géologue ; par contre, pour des reliefs plus prononcés tels les massifs montagneux, l'effet prend une ampleur considérable et peut fausser l'interprétation. Nous détaillerons plus particulièrement ces aspects dans la seconde partie.

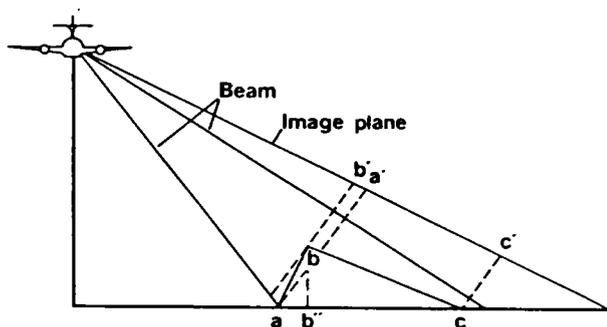


fig 1.3.4-a-Effet de "Layover"

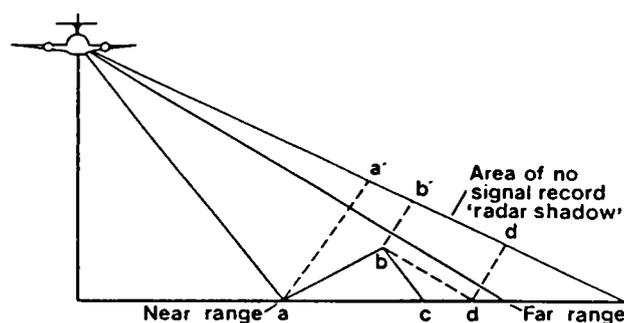


fig 1.3.4 -b- Principe de l'ombre radar

[extrait de Trevett-1986]

## 1.4 - Un satellite nouvelle génération : ERS-1.

### 1.4.1 L'innovation.

La généralisation de l'imagerie radar comme procédé spatial d'observation de la Terre a connu un nouvel essor avec le lancement de ERS-1, un satellite radar nouvelle génération, bénéficiant des dernières innovations en matière de technologie spatiale et de procédés de transmission et traitement des données. Quand l'ESA (European Space Agency) a entrepris le développement du satellite ERS-1, l'un de ses objectifs majeurs était d'innover par rapport aux satellites de télédétection déjà en orbite ou en construction. L'innovation réside essentiellement dans la nature de l'information enregistrée, passant des systèmes "passifs" d'enregistrement du rayonnement naturel émis ou réfléchi par la Terre, à un système actif qui envoie vers le sol un faisceau d'hyperfréquences et analyse celles qui sont réfléchies vers le satellite. Equipé

d'instruments micro-onde (AMI, Active Microwave Instruments) [Annexe 1] - dont la technologie a été en partie développée dans le cadre de la brève mission SEASAT et au cours d'expériences menées à bord de la navette américaine - ERS-1 offre plusieurs paramètres de mesure non couverts par les systèmes satellitaires existants. Il constitue le premier élément d'un programme à long terme, ambitieux, initié par l'ESA, devant être poursuivi en 1994 par le lancement de ERS-2, et avant la fin de ce siècle par la construction d'une plateforme d'observation polaire.

#### 1.4.2 Orbitographie.

Mis en orbite le 17 juillet 1991 par un lanceur Ariane, ERS-1 décrit une orbite elliptique, héliosynchrone, avec une inclinaison de  $98.5^\circ$  (quasi-polaire), à 785 km d'altitude [Annexe 1]. Les satellites, dès lors qu'ils sont équipés de systèmes actifs, opèrent habituellement sur une orbite presque polaire, ce qui signifie qu'ils suivent une trajectoire de vol inclinée autour de la Terre. Le satellite "descend" le long d'une face du globe et "remonte" le long de l'autre face ("mode descendant" ou "mode ascendant"). Quand, après une rotation de la Terre, le satellite illuminera la même cible, les trajectoires de vol des différents passages feront un angle entre elles, définissant ainsi des traces croisées [fig 1.41 a]. Cet effet n'est jamais observé pour les satellites optiques imageurs puisque l'image ne peut être obtenue que lorsque le satellite traverse la face terrestre illuminée par le soleil.

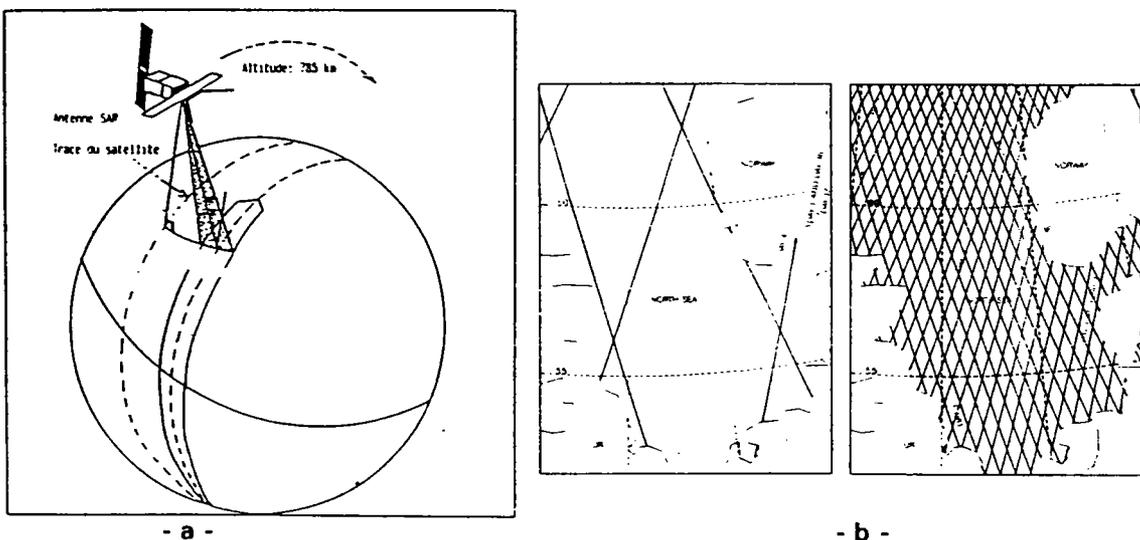
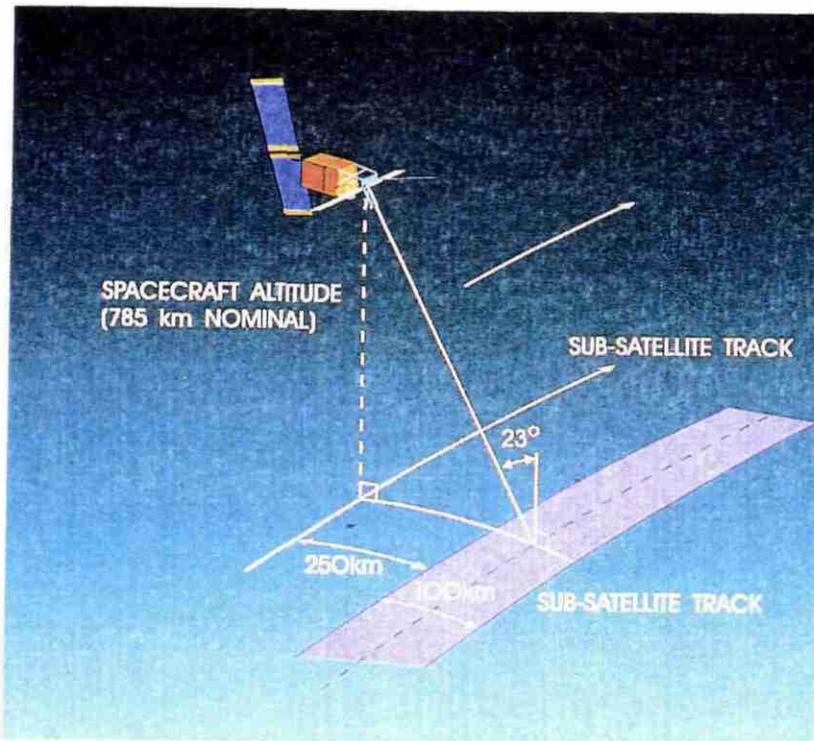


fig.1.4.1 a - configuration de vol du satellite ERS-1 (mode SAR imageur)  
 b - Comparaison de densité de traces au sol des trajectoires d'ERS1 :  
 exemple des cycles à 3 jours et 35 jours sur la Mer-du-Nord.

Les principales caractéristiques d'ERS-1 sont répertoriées [fig 1.4.2]. Outre le mode "image", le SAR embarqué à bord du satellite peut fonctionner en mode "vagues". Dans ce cas, le faisceau du radar est concentré sur une zone de 25 kilomètres carrés et l'on extrait, des informations reçues, le spectre des vagues, c'est-à-dire leur décomposition en ondes de différentes fréquences. Le SAR tel que nous l'utiliserons en interférométrie - mode image- illumine une bande d'environ 100 km de large, située à 250 km à droite du plan vertical de la trajectoire. Il est opérationnel 12 mn par orbite (seulement 4 mn en éclipse) du fait de la capacité de ses batteries. Ses paramètres sont fixes, à l'exception du mode expérimental (RTM) au cours duquel l'angle de visée peut atteindre  $35^\circ$ . Enfin, sa mission est divisée en six phases permettant des prises de vue selon une périodicité accrue [Annexe 1].



fréquence : 5.3 GHz  
 (bande C)  
 polarisation: V V  
 résolution : 30m / 30m

fig 1.42 Géométrie de visée du SAR - ERS1

Le choix de la période de répétitivité des orbites nécessite un compromis entre les exigences d'une surveillance continue d'un site donné et la couverture globale terrestre assurée par le SAR. En effet, les fréquences d'échantillonnage temporel et spatial sont inversement proportionnelles [fig 1.41 b]. Pour le cycle à 3 jours par exemple, les traces au sol des orbites seront séparées d'environ 930 km à l'équateur (460 km à 60° de latitude), alors qu'un cycle de répétitivité de 35 jours donnerait des traces séparées par seulement 80 km (soit une couverture terrestre complète pour une largeur de fauchée de 100 km). En clair, le choix de la période orbitale dépend de la mission donnée au satellite.

Enfin, cette description, bien que sommaire, serait incomplète si l'on ne mentionnait pas l'important réseau de stations de réception au sol [Annexe 1]. L'importance du flot de données acquises par le SAR-mode image- a conduit l'ESA à opter pour une transmission de celles-ci, plutôt qu'à leur enregistrement à bord du satellite. Ceci suppose que le satellite soit en vue d'une station de réception. Une quinzaine de stations sont opérationnelles, et assurent une bonne couverture de l'hémisphère Nord et de l'Antarctique; d'autres sont prévues, notamment pour une meilleure couverture de l'Afrique. Pour le SAR-mode "vagues", l'information est stockée à bord, puis diffusée lors du passage du satellite en vue des stations de Kiruna (Suède), Fucino (Italie), Gatineau et Prince Albert (Canada), ou Maspalomas (Iles Canaries, Espagne).

## **II - RADAR à SYNTHÈSE d'OUVERTURE (SAR) - APPLICATIONS GÉOLOGIQUES et TOPOGRAPHIQUES.**

*Note au lecteur : cette partie se veut extrêmement synthétique. Elle résume les principaux acquis en matière de télédétection radar dans les domaines de la géologie et de la cartographie. Pour une plus ample documentation, se référencer en annexe bibliographique aux thèmes "études radar, radar et géologie, radar et cartographies".*

Le radar a démontré sa capacité à fournir des informations de terrain détaillées indépendamment du temps et des conditions d'éclairage, en offrant un choix de directions de visée multiples. L'analyse des images radar en géologie et géomorphologie pose des problèmes particuliers par rapport aux autres images de télédétection. D'une part les déformations géométriques dues au relief font apparaître des artefacts, d'autre part le speckle limite la résolution des images.

Bien qu'initialement conçu pour l'observation océanographique, le radar imageur à ouverture synthétique embarqué sur ERS-1 est un capteur très intéressant pour les études géologiques et géomorphologiques car il permet l'observation de vastes régions à couvert nuageux fréquent avec une bonne résolution spatiale. Le radar présentera ses meilleures performances dans les régions à forte couverture nuageuse ou à végétation dense. Dans certains cas où la couverture visible ou infra-rouge n'existe pas, il sera un substitut apprécié, particulièrement dans le cadre d'éventuels projets d'aménagement dans les pays de la zone équatoriale. Ailleurs, le caractère synoptique des images spatiales fournit au géologue une arme nouvelle lui permettant d'enrichir l'analyse de régions déjà bien connues en réalisant une réinterprétation dans un cadre souvent plus cohérent.

### **II.1 - Spécificité de l'information radar dans le domaine géologique.**

L'imagerie radar est utilisée dans le cadre d'investigations géologiques principalement en raison de la sensibilité du radar à la topographie, à la rugosité de surface et aux propriétés diélectriques du matériau, relatives à la lithologie, à la structure et à la géomorphologie. Le signal rétrodiffusé dépend, en dehors des paramètres liés à la propagation des ondes (angle d'incidence, fréquence, polarisation), de facteurs propres à la surface éclairée, qui d'ailleurs concernent tous les géologues, puisqu'il s'agit de l'orientation de la pente, de la nature du sol, de l'humidité et de la rugosité. L'information qu'il apporte traduit essentiellement l'effet de pente dès l'instant que la morphologie est affirmée, et, de manière secondaire, l'occupation et la nature du sol. La nature physique du signal fait que les seuls contours facilement mis en évidence sont ceux qui correspondent à des différences de modelé, de pente et de rugosité.

L'illumination oblique du radar a permis d'observer des caractéristiques géologiques qui jusque là n'avaient pas été détectées. Plusieurs exemples ont été cités dans la littérature où le radar a effectivement permis de définir des traits structuraux, tels que les failles et linéaments, non accessibles par l'utilisation des moyens de reconnaissance classiques. Il faut signaler l'importance de la direction du vol de la plate-forme par rapport à la direction d'allongement des structures analysées : celles-ci seront d'autant mieux révélées lorsqu'elles sont perpendiculaires au faisceau.

### **II.2 - Une nouvelle interprétation de l'imagerie spatiale.**

L'utilisation de radars imageurs pour les investigations géologiques requiert un effort inter-disciplinaire, qui inclut à la fois une compréhension théorique du mode de fonctionnement du radar, de sa spécificité, et une compréhension plus appliquée que

seul un géologue expérimenté est en mesure de fournir. Les techniques d'interprétation habituellement utilisée pour l'analyse des images délivrées par les capteurs multispectraux sont insuffisantes pour l'exploitation des images radar.

Parce que l'imagerie radar diffère des photos aériennes, des données SPOT ou LANDSAT, par sa géométrie, sa résolution spatiale et la nature des phénomènes recensés, son interprétation nécessite une approche différente et la reconnaissance de "signatures" nouvelles. Mais surtout, elle présente une perspective à laquelle nous n'étions pas habitués. Le terrain se présente au géologue dans une configuration qui ne lui est pas familière. Si pour la photographie, par exemple, deux points sont confondus lorsqu'ils sont alignés avec l'objectif, en imagerie radar, deux objets séparés par une distance égale ou inférieure à la résolution azimutale ne seront pas discernables et apparaîtront sur le radar comme un signal retour issu d'une seule cellule de résolution. Un autre effet spécifique à ce type d'imagerie est celui qu'entraîne l'existence de relief. On observe alors une contraction des lignes de pixels sur l'image, se traduisant par des distortions et surtout un rabattement des reliefs vers le radar. Le ton, la texture, la forme, l'ombre, sont autant d'éléments de reconnaissance sur l'image qui contribuent à l'extraction de données géologiques.

### **II.3 - Perspectives d'analyse géologique multi-source en télédétection.**

Le géologue qui utilise l'imagerie radar pour des synthèses géologiques a généralement cinq objectifs ultimes : la corrélation d'affleurements d'un endroit à l'autre, la détermination de structures géologiques, la délimitation de types de roches ou d'unités lithologiques, la détermination de la séquence stratigraphique, éventuellement, pour les phénomènes évolutifs, de leurs mouvements à partir de données multi-temporelles.

Les données radar s'intègrent utilement dans une étude multi-capteurs. L'exploitation conjointe des images optiques et micro-ondes devrait faciliter les analyses géologiques et géomorphologiques, en particulier dans le cas où les éléments lithologiques et structuraux se différencient tant par des variations de réflectance et d'éclairement (induisant des variations de teinte et d'intensité pour l'imagerie "optique") que par des variations de pente, de rugosité, d'humidité ou de couverture végétale (induisant des variations de rétrodiffusion pour les images radar). La comparaison entre les données optiques et les données hyperfréquences devrait permettre de bénéficier de la base cartographique des premières et la grande capacité des secondes à fournir une image détaillée de la morphologie. L'intérêt se justifie d'autant plus que les avantages et les faiblesses de chacun d'eux sont complémentaires. En matière d'analyse de mouvements de terrain, et plus précisément de glissement, leur croisement local a montré une meilleure caractérisation.

### **II.4 - Utilisation du SAR en cartographie du relief.**

Un autre apport important de l'imagerie satellitaire est l'aide à la cartographie du relief. Elle constitue l'une des principales applications de l'imagerie SAR. En effet, les variations d'altitude du terrain affectent les différentes informations contenues dans une image SAR, c'est-à-dire la localisation spatiale d'un point dans l'image (coordonnées image), et la réponse associée au pixel correspondant (signal complexe défini par son amplitude et sa phase). La sensibilité particulière du radar au relief en fait un instrument de prédilection pour la cartographie et l'interprétation visuelle de structures géologiques. L'attente du radar pour la cartographie fine vise surtout à mettre en évidence des limites topographiques caractérisées par de faibles dénivellés, donc par la restitution d'un pseudo-relief (ombre) de faibles modelés de terrain. L'analyse des variations de rugosité entre deux types de formations superficielles devrait permettre de séparer des unités géologiques assez fines.

## La mise à profit de la diversité des informations enregistrées par le SAR

- information géométrique (distance/azimut)
- " radiométrique (amplitude du signal rétrodiffusé)
- " interférométrique (phase du signal)

a permis d'envisager trois techniques d'extraction d'informations tridimensionnelles, qui sont la *radargrammétrie*, la *radarclinométrie* et l'*interférométrie*. Les principales caractéristiques, performances et contraintes de ces techniques sont recensées dans l'article de L. Polidori [1991]. Nous nous contenterons d'exposer le principe des deux premières, la troisième faisant l'objet d'un développement plus approfondi dans le chapitre suivant.

En *radargrammétrie*, un point est localisé à la fois par la connaissance de sa distance à l'antenne (*range*) et de la fréquence Doppler. Cette méthode est fondée sur les relations entre l'altitude et la position d'un point dans l'image. Lorsque l'on dispose de deux images (superposables) d'un même site, on calcule par cette technique l'intersection de deux cercles de localisation d'un point grâce à des équations géométriques. Ces cercles sont à l'intersection de la surface sphérique, définie par la fréquence Doppler, et de la surface sphérique, définie par la distance cible/antenne, pour chacune des acquisitions. Contrairement à cette technique de mesure directe d'élévation de pixels, la *radarclinométrie* permet d'élaborer un profil topographique à partir des dérivées premières de la surface (pente et angle d'incidence), et d'un modèle de rétrodiffusion.

On peut actuellement établir à partir des données satellitaires radar, des cartes au 1/100.000ème, voire au 1/50.000ème. L'observation latérale des satellites permet de reconstituer l'altimétrie à partir d'images de la même zone prises depuis des trajectoires voisines. C'est le cas d'ERS-1. De plus, des travaux sont actuellement en cours pour développer une méthode interférométrique, afin d'extraire des images radar une information 3D sur la topographie des zones observées. L'objectif affiché de l'*interférométrie* est de générer un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution du globe qui pourrait servir de bases de données topographiques pour tous les autres capteurs.

## CHAPITRE 2

### INTERFEROMETRIE RADAR

#### I - INTRODUCTION

##### I.1 - Représentation complexe de l'onde

Dans les techniques actives de télédétection, le dispositif expérimental comporte sa propre source d'énergie électromagnétique (l'émetteur) et analyse dans un récepteur les caractéristiques de l'onde "retour". Le radar est le prototype même de ces méthodes, l'antenne de réception et d'émission étant le plus souvent confondues (radar monostatique). L'onde radar est interceptée par la cible, qui rétrodiffuse une partie du signal qu'elle a reçu vers l'antenne de réception [Rapport DEA sur l'interaction d'une onde électromagnétique avec une surface rugueuse - Carnec 1992].

Par le biais de la transformation de Fourier, l'onde réelle (solution propre des équations de Maxwell) est décomposée en une somme adéquate d'ondes monochromatiques (toutes les composantes des champs varient sinusoidalement dans le temps avec la même pulsation). Dans le domaine de la télédétection, la distance radar/cible est suffisamment grande par rapport aux dimensions de l'antenne pour que l'on puisse assimiler les ondes à des ondes planes. D'un point de vue mathématique, les ondes électromagnétiques se résument à la donnée des fonctions spatio-temporelles décrivant l'évolution des champs électriques  $\vec{E}$  et d'induction magnétique  $\vec{B}$ . En adoptant une notation complexe, le champ électrique rétrodiffusé par une cible  $d$  s'écrit comme le vecteur de Fresnel de composantes:

$$E_j^d(r, t) = E_{0j}^d \exp i(\omega_0 t + \phi_j^d(r)) = E_j^d(r) \exp(i\omega_0 t) \quad (1)$$

$j \in (x, y, z)$  est l'indice des coordonnées

$E_{0j}^d$ : amplitude réelle

$\omega_0$ : pulsation radar

$\phi_j^d(r)$ : phase

La manière dont la sommation est effectuée présente d'autant plus de difficultés que l'on s'intéresse à des milieux matériels présentant des irrégularités (surfaces réfléchissantes rugueuses...). La spécificité de la technique interférométrique nécessite que l'on prenne en compte la cohérence mutuelle entre les différentes ondes intervenant. Elle n'atteint son efficacité que si les phases des signaux sont parfaitement définies. Or, une conséquence immédiate de la fluctuation des champs est que toutes les grandeurs caractéristiques des ondes subissent des irrégularités spatio-temporelles. Au niveau du capteur, nous mesurons le signal issu de l'onde rétrodiffusée résultante, soit pour chaque diffuseur, l'amplitude complexe :

$$E^d(r) = E_0^d(r) \exp(i\phi^d) \quad (2)$$

où  $\phi^d$  est la phase totale de l'onde radar.

Une étude faite par Goodman (1975) a montré que l'amplitude complexe  $E_{tot}(r)$  du champ total rétrodiffusé par une cellule de résolution peut s'écrire comme la somme de  $n$  contributions de chaque élément diffuseur  $d$

$$E_{tot}(r) = \sum_{d=1}^n E^d(r) = \sum_{d=1}^n E_0^d(r) \exp(i\phi^d) \quad (3)$$

Après démodulation, on peut recueillir les valeurs en phase et en quadrature de phase  $X$

et  $Y$  de l'amplitude complexe  $E_{tot} = X + iY$  (4) soit

$$\begin{aligned} X &= E_0 \cos \psi & \psi &= \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \\ Y &= E_0 \sin \psi & \text{ou} & \\ E_0 &= \sqrt{X^2 + Y^2} \end{aligned}$$

## 1.2 - Utilisation de la phase en télédétection radar

L'utilisation de la phase de l'onde radar est une source d'information complémentaire, encore relativement peu exploitée. Amplitude et phase sont deux quantités totalement indépendantes. La phase des images SAR interférométriques est reliée exclusivement à la topographie du terrain telle qu'elle est observée par le SAR. L'image numérique utilisée se présente sous forme d'image en valeurs complexes proportionnelles aux valeurs  $X$  (dite "en phase") et  $Y$  (dite "en quadrature") du signal, permettant ainsi d'élaborer une image de phase ( $\psi = \arctg(Y/X)$ ).

La phase mesurée peut être décomposée comme la somme de deux contributions dues respectivement à la cible et au trajet aller-retour parcouru par l'onde. Soit  $\psi = \xi + \phi$  où  $\xi$  est la contribution de phase liée à la cible et  $\phi$  celle liée au trajet aller-retour. L'évaluation de la première contribution ( $\xi$ ) devrait permettre, en comparant plusieurs images prises simultanément avec des polarisations différentes, de mettre en évidence les modifications intervenues au niveau de la cible, et ainsi, de déterminer des signatures de phase. ( $\xi$ ) est relative à la fois aux caractéristiques radio-électriques des cibles et à la distribution des cellules élémentaires à l'intérieur de la cellule de résolution. Les travaux effectués dans ce sens ont porté essentiellement sur des surfaces agricoles en permettant d'accroître les possibilités d'identification et de classification des cultures (Ulaby et al 1987).

Nous nous intéresserons à la mesure de la seconde contribution de phase ( $\phi$ ), caractéristique de la distance du SAR à la cible. Ceci nécessite d'avoir des cibles dont les propriétés et la distribution n'aient pas été modifiées dans les images. Cette approche est à l'origine des travaux d'interférométrie.

## II - L'INTERFEROMETRIE

### II.1 - Introduction : les enjeux

Pour générer une image caractéristique de la topographie d'un terrain, deux informations

de base sont utilisées classiquement avec le SAR : les décalages temporels (émission/réception) et Doppler. Ceci ne permet pas la dérivation de la géométrie 3D de la surface. L'adjonction d'une mesure indépendante est requise. Dans le cas d'un interféromètre SAR, cette mesure additionnelle est délivrée par une seconde antenne réceptrice placée perpendiculairement à la trajectoire de l'avion, à une distance B (baseline) de la première, ou par la même antenne au cours de passages orbitaux multiples. Dans tous les cas, il s'agit d'observation d'une même scène sous des conditions géométriques différentes.

Les radars imageurs présentent un problème commun avec d'autres capteurs cartographiques qui est la déformation de l'image enregistrée par le capteur lorsque le terrain est à fort relief. Dans le cas des montagnes, les images non corrigées obtenues avec un radar latéral sont déformées par un effet de raccourci ou de déplacement vertical vers la ligne de vol du SAR. Les données satellitaires sont particulièrement sujettes à ce type de déformation, à cause de leur angle de visée prononcé. L'emploi d'une deuxième antenne de réception, décalée par rapport à la première, ou d'une seconde orbite, permet d'obtenir un complément d'information dont on peut déduire l'altitude du terrain imagé et ainsi rectifier les images. La phase de l'image issue de la technique d'interférométrie dépend de la position relative des deux capteurs, et des altitudes relatives des points diffuseurs.

L'interférométrie présente des limites théoriques et pratiques, et doit encore faire ses preuves dans des situations concrètes. Certaines de ses limites sont intrinsèquement liées à la physique du SAR, typiquement pour ce qui concerne les mouvements du porteur et la qualité des images. D'autres limites (pas forcément indépendantes de celles évoquées ci-dessus) dépendent de la spécificité de la technique (baseline, décorrélation des échos retour,...).

Précisons que l'évaluation qu'il m'a été rendue possible d'en faire ne repose nullement sur l'interprétation effective de produits interférométriques SAR-ERS1 (pas encore, au stade actuel de la thèse), mais constitue la synthèse d'une compilation bibliographique recensant les résultats d'interprétation d'interférogrammes issus de données SAR, ayant des caractéristiques proches de celles du SAR d'ERS1 (bande C,  $\alpha = 23^\circ$ ) [références bibliographiques en annexe].

Retenons que les techniques micro-ondes actives utilisant l'interférométrie fournissent un moyen nouveau d'acquisition de données topographiques, en vue de compléter la vue 3D des propriétés de surface et de corriger les distortions inhérentes à l'imagerie SAR. Graham [1974], puis Zebker et Goldstein [1986] ont montré qu'il était possible de générer des bases de données topographiques par interférométrie radar. Le problème est envisagé à l'échelle globale ; la génération d'un MNT haute résolution du globe qui pourrait servir comme données de calibration pour tous les capteurs de télédétection est une perspective soulevée par la communauté scientifique américaine.

Enfin, l'extrême sensibilité de la technique aux distances relatives, la haute résolution spatiale (typiquement 10m), sa large couverture offrent la perspective d'un rescencement possible des changements de surface et des phénomènes évolutifs, tels que les mouvements de terrain, les phénomènes géophysiques incluant les déformations dans les zones de faille, les mouvements de plaques, les déplacements résiduels d'évènements sismiques ou volcaniques, et mobilisent déjà plusieurs groupes de chercheurs (*JPL*, Gabriel, Goldstein, Zebker, 1989 ; *CCRS*, Gray, 1992 ; *groupe Fringe*, 1992 ; *CNES*, Massonnet, 1985/93 ; ...).

## II.2 - Principe - théorie

Si au niveau du capteur, les ondes issues de cibles physiquement dissociées sont cohérentes, c'est-à-dire s'il existe une relation de phase définie et prévisible entre les ondes (les phases des ondes rétrodiffusées sont distribuées aléatoirement entre 0 et  $2\pi$  et les différences de phase indépendantes du temps), les signaux interfèrent les uns avec les autres. Ceci suppose que les diffuseurs élémentaires soient effectivement des points diffuseurs.

Qu'il s'agisse d'interférométrie SAR aéroportée, utilisant un enregistrement simultané par deux antennes des échos rétrodiffusés par une cible, ou d'interférométrie SAR spatiale, basée sur l'enregistrement de signaux au cours de passages multiples d'un satellite au dessus d'une même scène, le principe reste identique : obtenir l'interférence constructive ou destructive d'ondes cohérentes enregistrées à partir de capteurs séparés par une distance B.

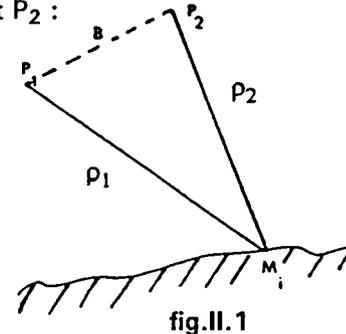
Les franges d'interférence sont produites en combinant point à point les deux jeux de mesures afin d'obtenir une seule image dont la phase est la différence des deux phases originelles et l'amplitude résultante, le produit des deux amplitudes. Soient  $P_1$  et  $P_2$  les positions des deux capteurs (ou du même capteur mais dans deux configurations géométriques différentes) et  $M_i$  la position d'un point diffuseur de la scène. Le champ rétrodiffusé par  $M_i$  et mesuré en  $P_1$  ( $P_2$ ) aura pour phase  $\phi_{1,i}$  ( $\phi_{2,i}$ ).

Considérons la différence de trajet de l'onde  $\delta = 2(\rho_1 - \rho_2)$  (5), celle-ci entraîne une différence de phase entre les mesures effectuées en  $P_1$  et  $P_2$  :

$$\phi_i = \phi_{1,i} - \phi_{2,i} = \omega_0 \frac{\delta}{c} = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \quad (6)$$

$\omega_0$  = pulsation de l'onde radar

$c$  = vitesse de la lumière



Cette différence de phase  $\phi_i$  est obtenue à partir des amplitudes complexes enregistrées en  $P_1$  ( $E_{1,i}$ ) et  $P_2$  ( $E_{2,i}$ ), en multipliant l'une par la valeur complexe conjuguée de l'autre, soit

$$E_{1,i} \cdot E_{2,i}^* = E_{1,i} E_{2,i} \cdot \exp(j(\phi_{1,i} - \phi_{2,i})) \quad (7)$$

En pratique, le pixel correspondant de la seconde image est corrigé selon la géométrie de l'image de référence choisie (ici, la première). L'alignement des deux images SAR complexes est nécessaire pour obtenir des termes d'interférences. Plusieurs méthodes ont été proposées dont celle de Gabriel & Goldstein [1988]. Elle repose sur l'observation suivante : les franges sont d'autant plus nettes et marquées (autrement dit, les effets de cohérence plus prononcés), que l'association des pixels correspondants est établie le plus précisément possible. On peut alors examiner le spectre en puissance des fréquences de frange : la présence de quelques fréquences dominantes assurera une bonne superposition des images. Au contraire, lorsque l'alignement n'est pas correct, les franges sont bruitées et il apparaît une plus grande égalisation du spectre de puissance.

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la qualité des franges dans le domaine spatial en utilisant le gradient, Laplacien ou autres filtres passe-haut. Celles-ci

peuvent atteindre une précision d'alignement au pire de l'ordre du pixel. Un processus d'interpolation est nécessaire pour atteindre une précision subpixel de l'alignement. La technique utilisée au CNES [Massonnet 1992] dans la procédure interférométrique repose sur la corrélation locale modélisée à l'échelle de l'image. La précision des résultats obtenus est de l'ordre de 3 à 5/100<sup>e</sup> de pixel.

Néanmoins, dans la mesure où la précision de l'intercorrélation des images est bien inférieure à celle de l'interférométrie, on peut remarquer l'existence de franges résiduelles.

Enfin, la différence de phase  $\phi_i$  évaluée, il reste à relier cette valeur à l'élévation du terrain en  $M_i$ . Plusieurs approches ont été envisagées. Nous distinguerons successivement l'interférométrie spatiale de l'aéroportée, dans la mesure où l'écart de distance cible/antenne entraîne des approximations différentes.

### II.2. 1 - Interférométrie SAR satellitaire

Pour l'interférométrie satellitaire, nous considèrerons tout d'abord le cas d'orbites supposées parallèles. Les modifications qu'entraîneraient le non-parallélisme des orbites seront développées ensuite.

S1 et S2 représentent les positions du satellite observant la même scène, aux temps t1 et t2. En adoptant la configuration ci-contre, on définit :

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} (S_1 M_i - S_2 M_i) \quad (8)$$

$\phi_i$  représente la phase de l'image interférométrique. Zebker & Goldstein (1986), puis Prati et Rocca (1990) ont montré que la différence de phase  $\delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  entre 2 pixels voisins de la même image interférométrique pouvait s'exprimer comme une fonction de la variation altimétrique  $h_p$  du terrain.

L'expression, obtenue en différentiant  $\phi_i$  par rapport à chacune des coordonnées, peut être approximée, dans le cas où la distance cible/antenne est nettement supérieure à la largeur du faisceau, par

$$\delta\phi = 4\pi \frac{B h_p}{\lambda \rho \sin(\alpha)} \quad (9)$$

Dans le cas d'un terrain ayant une pente constante de  $\alpha'$  degrés, l'expression devient

$$\delta\phi = 4\pi \frac{B h_p}{\lambda \rho \sin(\alpha - \alpha')} \quad (10)$$

En fait, les phases sont généralement modifiées en soustrayant à la différence de phase mesurée celle relative au terrain plat (9), de telle sorte que les franges soient caractéristiques des variations altimétriques de terrain.

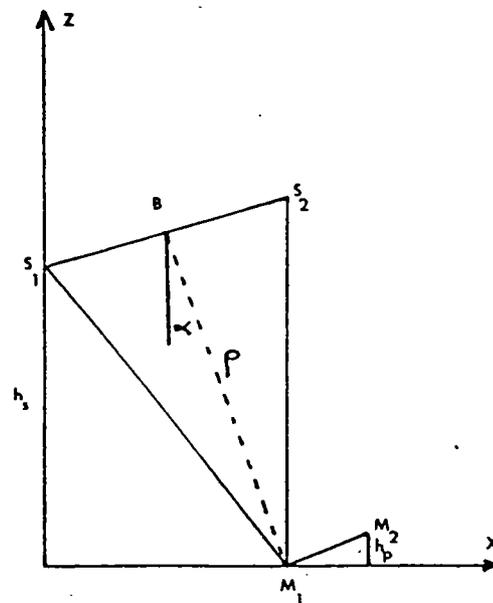


fig.II.2 Interférométrie satellitaire ( orbites parallèles )

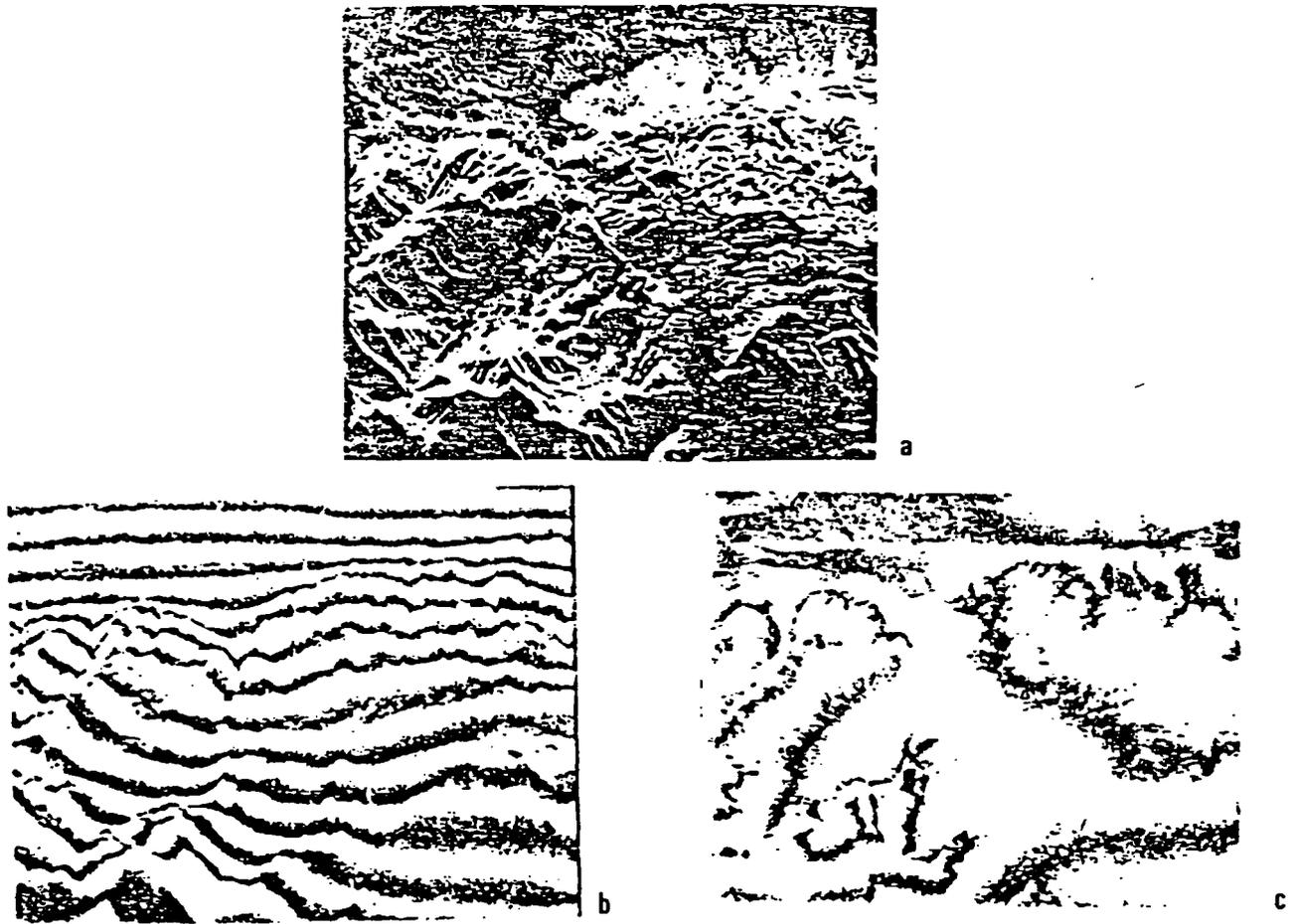


fig.II.3 Images SAR-SEASAT interférométriques [Prati & Rocca 1990]  
 a - Valeur absolue de l'image  
 b - Phases de la même image  
 c - Phases modifiées (obtenues en soustrayant les phases relatives au terrain plat)

Lorsque les orbites sont parallèles et séparées transversalement, le principe de dérivation de l'information altimétrique est exactement celui utilisé pour l'interférométrie à deux antennes ; la distance entre les antennes n'est autre que l'écart orbital. Pour ce qui est des orbites croisées, l'approche est quelque peu différente et nécessite une correction supplémentaire en azimuth afin d'obtenir des pixels parfaitement superposables. Les contraintes semblent toutefois maîtrisées sur le plan théorique et des tests ont été réalisés à partir de données SIR-B (Shuttle Imaging Radar system) [Gabriel & Goldstein - 1988 ; Massonnet & Rabaute 1993].

Nous ne développerons ici que le calcul de la différence de phase  $\phi$  entre les images pour une configuration d'orbites séparées par un angle  $2\eta$ , en l'absence de relief. En adoptant les notations de la figure II.4, la distance de l'antenne la plus basse à la cible est donnée par  $\rho = (y^2 + z^2)^{1/2}$  ; soit, en différentiant l'expression,

$$\delta\rho = \frac{z}{\rho} \delta z + \frac{y}{\rho} \delta y \quad (11)$$

$\delta z$  = différence d'altitude entre les deux orbites,

$\delta y$  = composante horizontale de la séparation d'orbites.

avec  $\delta y = 2xtg\eta$ .

$$\frac{y\delta y}{\rho} = \frac{2x}{\rho} \operatorname{tg}\eta \sqrt{\rho^2 - z^2} = 2x \operatorname{tg}\eta \sqrt{1 - \frac{z^2}{\rho^2}} \quad \text{d'où } \delta\rho = \frac{z\delta z}{\rho} + 2x \operatorname{tg}\eta \sqrt{1 - \frac{z^2}{\rho^2}} \quad (12)$$

Le croisement entre orbites crée un déplacement selon y entre les images, qui croît linéairement avec la distance en azimuth. La variation de phase azimutale observée en fait, d'environ  $\pi$  radians par pixel, amène à modifier l'expression (6) :

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{z\delta z}{\rho} + x' \operatorname{tg}\eta \sqrt{1 - \frac{z^2}{\rho^2}} \right) - 2\pi f x' \quad (13)$$

où  $x' = x - x_0$  avec  $x_0$  correspondant au point de l'interférogramme où la variation de phase est nulle ( $d\phi/dx = 0$ ).

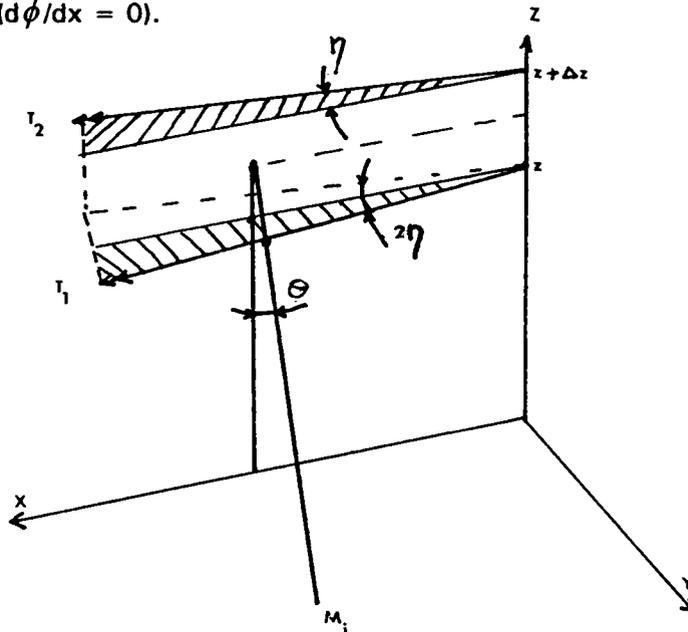


fig II.4 Interférométrie satellitaire (orbites croisées)

L'expression ci-dessus prévoit la différence de phase en l'absence de topographie. La différence entre l'interférogramme expérimental et cette évaluation en terrain plat est effectivement associée à la topographie de la scène.

En fait, l'erreur d'approximation planimétrique de la scène observée par le radar est du même ordre de grandeur que celle faite en considérant les orbites parallèles (puisque celles-ci sont en définitive toujours croisées). La prise en compte du modèle d'orbites croisées ne se justifie que dans la mesure où un modèle sphérique ou ellipsoïdal terrestre est adopté.

## II.2. 2 - Interférométrie SAR aéroportée

Dans le cas de l'interférométrie aéroportée, l'altitude du capteur  $h_S$  (entre 6 000 et 8 000 m) est de l'ordre de la largeur au sol du faisceau. Les approximations faites précédemment pour exprimer la différence de phase (9 et 10) ne sont plus applicables à cette configuration d'observation. Il nous faut reprendre l'expression exacte de la différence de phase entre les échos rétrodiffusés,

$$\text{soit } \phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (A_1 M_i - A_2 M_i) \quad (14)$$

où  $A_1$  et  $A_2$  représentent les positions des 2 antennes,

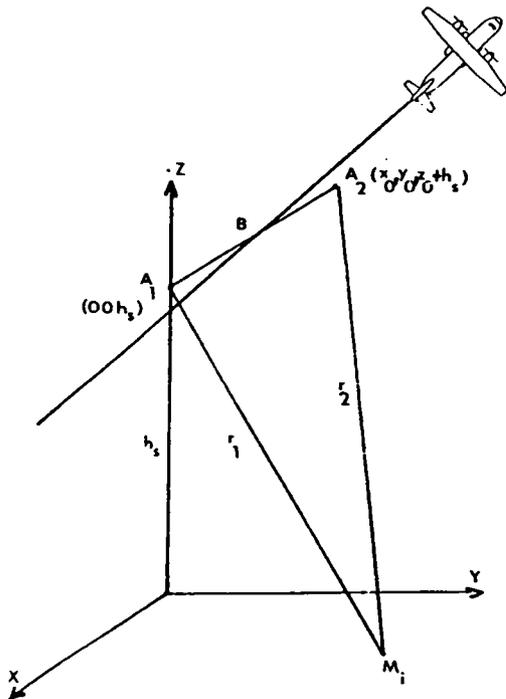


fig. II.5 Interférométrie aéroportée

$(x, y, z)$  repère au sol, avec  $(x)$  orienté selon la trajectoire et  $(z)$  vertical,

$$A_1(0,0,h_s) ; A_2(x_0, y_0, z_0 + h_s)$$

$$r_1 = A_1 M_i \quad r_2 = A_2 M_i \quad B(x_0, y_0, z_0)$$

En adoptant cette notation :

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (r_1 - r_2) \quad (15)$$

$$\text{avec } r_2 = \sqrt{(r_1 - B)^2} = \sqrt{r_1^2 + B^2 - 2r_1 B}$$

$$\text{et } r_1 B \begin{matrix} 0 \\ y_0 \sqrt{r_1^2 - h_s^2} \\ h_s z_0 \end{matrix}$$

alors, (16)

$$\phi_i = \frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - \sqrt{r_1^2 + B^2 - 2y_0 \sqrt{r_1^2 - h_s^2} - 2hz_0})$$

$r_1$  est déterminé par le trajet AR du signal émis par l'antenne émettrice  $A_1$ .

### II.2. 3 - Evaluation de l'erreur altimétrique [ d'après Zebker-1992 ]

$\theta$  : angle de visée,

$\alpha$  : angle de la baseline mesuré par rapport à l'horizontale,

Les relations géométriques dans le triangle  $A_0 A_1 A_2$  donnent : (17)  
(18)

$$(\rho + \delta)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \alpha\right)$$

$$\sin(\theta - \alpha) = \frac{(\rho + \delta)^2 - \rho^2 - B^2}{2\rho B}$$

Le calcul d'erreur sur l'estimation altimétrique de  $A_0$  est mené en différentiant  $z(A_0)$  par rapport à sa variable  $\theta$  :

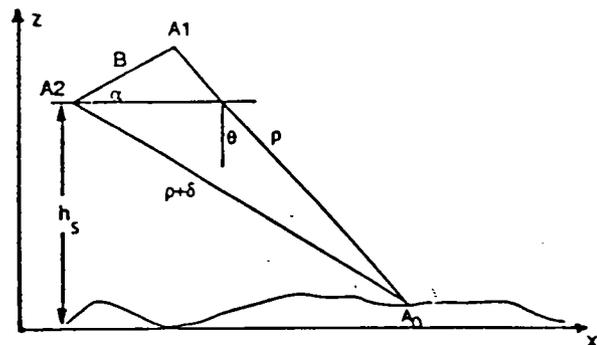


Fig. II.6 Evaluation de l'erreur altimétrique

$$z(A_0) = h_s - \rho \cos(\alpha - (\alpha - \theta)) \quad (19)$$

$$z(A_0) = h_s - \rho [\cos \alpha \cos(\alpha - \theta) + \sin \alpha \sin(\alpha - \theta)]$$

$$\text{soit } \frac{\partial z}{\partial \theta} d\theta = \left( \frac{\partial h_s}{\partial \theta} d\theta \right) + \rho \cos \alpha \sin(\alpha - \theta) d\theta - \rho \sin \alpha \cos(\alpha - \theta) d\theta \quad (20)$$

avec, en différentiant (19),

$$\cos(\alpha - \theta)d\theta = -\frac{2(\rho + \delta)d\delta}{2\rho B} \text{ or } \rho \gg \delta$$

$$\approx -\frac{d\delta}{B} = -\frac{\lambda}{2\pi B}d\phi \quad \text{d'après (6)}$$

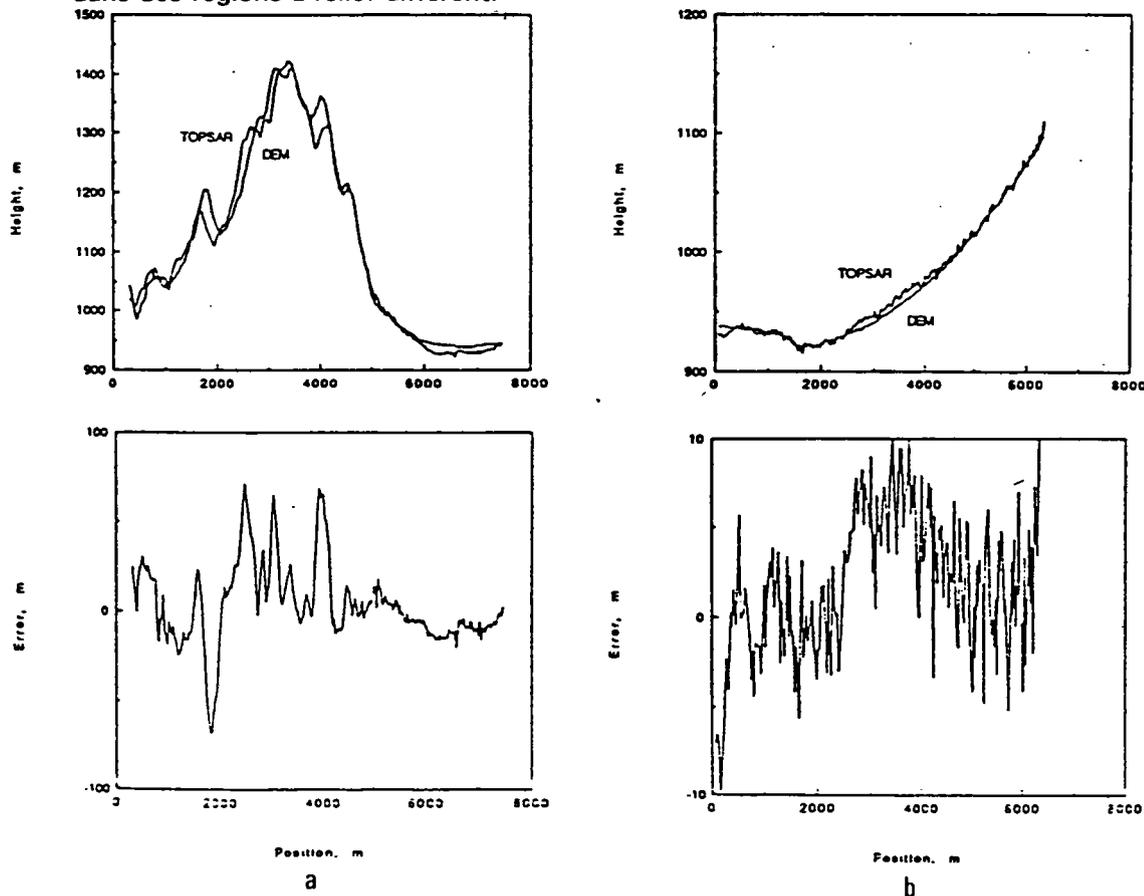
finalement

$$\sigma_h = \rho \cos(\alpha - \theta) [\cos \alpha g(\alpha - \theta) - \sin \alpha] d\theta$$

$$= \frac{\lambda \rho}{2\pi B} [\sin \alpha - \cos \alpha g(\alpha - \theta)] \sigma_\phi \quad (21)$$

Ce résultat peut être démontré en utilisant la taille du pixel comme unité [Massonnet-1992].  $\sigma_h$  est alors évalué comme étant l'altitude d'ambiguïté, ramenée à la taille du pixel, susceptible de provoquer le déplacement d'une frange.

La figure II.7 permet d'apprécier la précision des MNT interférométriques aéroportés dans des régions à relief différent.



a-fort relief (montagnes);écart-type d'erreur 23m. b-région de plaines;écart-type d'erreur 2.9m.

fig. II.7 Comparaison de MNT (30m) haute résolution (7m) et de profils topographiques obtenus par interférométrie aéroportée.

### II.3 - "Déroulement" de phase (phase unwrapping)

La technique, telle que nous venons de l'exposer, suscite des problèmes pratiques spécifiques dans l'exploitation des résultats qui, outre le bruit (de scintillement, instrumental, atmosphérique,...) et les corrections géométriques des images, nécessite des corrections de phase. Si les distances antenne-cible diffèrent d'un nombre entier de

longueur d'onde, les cibles apparaîtront avec des valeurs de phases identiques (6). La différence de parcours de l'onde est mesurable pour chaque pixel seulement pour une fraction de  $\lambda$  et ignore les différences de longueurs d'onde entières. En d'autres termes, des cibles situées à des altitudes différentes seront caractérisées par les mêmes phases.

La mesure altimétrique est compliquée par l'ambiguïté de  $2\pi$  associée aux mesures de phase. La quantité mesurée à partir de l'interférogramme n'est pas la phase exacte mais sa valeur principale limitée à l'intervalle  $[-\pi, +\pi]$ . La relation entre la phase et sa valeur principale  $\phi_p$  s'écrit  $\phi = \phi_p + 2n\pi$ . Autrement dit, une mesure de phase de  $\phi$  radians n'est pas différentiable d'une autre mesure de  $\phi + 2n\pi$  radians, avec  $n$  entier. Cette limitation aux valeurs principales est à l'origine des franges interférométriques et des discontinuités de phase typiques observées (du noir au blanc sur l'interférogramme). Pour calculer l'élévation de chaque point de l'image, le nombre entier de cycles exact doit être ajouté à chacune des valeurs principales. C'est ce que l'on appelle "le déroulement de phase" ou "phase unwrapping". La technique consiste à s'affranchir de l'ambiguïté de  $2\pi$  en examinant les différences de phase dans un champ à 2 dimensions et à suivre les phases sur l'image entière en partant d'un point de localisation donné et en ajoutant le multiple de  $2\pi$  approprié. Par multiple approprié, on entend celui qui minimise le changement de phase entre 2 pixels adjacents. Pour illustrer ce problème, considérons tout d'abord le cas unidimensionnel, avec une seule ligne d'image (à  $x$  constant), où les mesures de phase effectuées seraient représentées [fig.a] et développées [fig.b] :

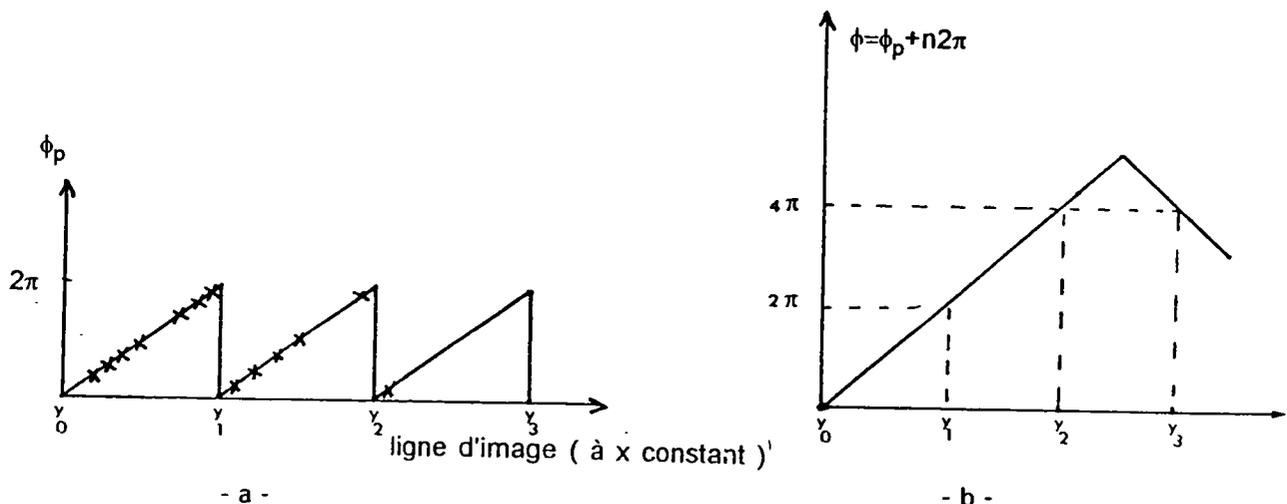


fig. II.8 "Déroulement" de phase

En supposant la scène suffisamment échantillonnée pour que la différence de phase entre pixels voisins n'excède pas  $1/2$  cycle, les discontinuités aux abscisses  $y_{n(n \in N)}$  seraient levées en ajoutant ou retranchant  $2\pi$  au passage de chaque discontinuité de telle sorte que les valeurs principales de phase soient proportionnelles à la carte d'élévation de terrain. Deux discontinuités adjacentes sont séparées par un incrément altimétrique constant et caractérisent les courbes de niveau de la carte d'élévation du terrain.

Plusieurs méthodes de déroulement de phase ont été proposées. A ce jour, aucune ne permet encore une automatisation systématique du processus. L'approche pratique suggérée par Zebker & Goldstein [1986-1988] pour limiter les incertitudes, réside dans l'utilisation de points de contrôle au sol situés sur la zone imagée et clairement identifiables, pour lesquels on dispose d'informations topographiques. Les hauteurs de ces points de contrôle peuvent alors être utilisées pour déterminer celles des pixels environnants. L'ambiguïté est levée par la connaissance de l'altitude "vraie" d'un point de l'image (par exemple, la surface de l'océan qui est par définition le niveau zéro).

Prati & Rocca [1990] proposent un nouveau développement de la technique de déroulement de phase à 2 dimensions. En émettant l'hypothèse que la valeur absolue du signal complexe rétrodiffusé soit non nulle et que la différence de phase entre pixels adjacents soit incluse entre  $-\pi$  et  $+\pi$  partout, la procédure envisagée consiste à intégrer les différences de phase le long d'un chemin d'intégration arbitraire, passant à travers tous les échantillons de phase. En fait, son application à de véritables interférogrammes fait surgir plusieurs problèmes liés :

- au bruit et au speckle qui affectent les mesures et peuvent corrompre l'interprétation altimétrique qui en est faite, précisément pour les pixels présentant une très faible rétrodiffusion ( rapport signal-sur-bruit faible ),
- à des écarts de phase entre pixels adjacents pouvant être supérieurs à  $+\pi$  ou inférieurs à  $-\pi$ , provoqués par un échantillonnage de la scène insuffisant par rapport au fort dénivelé du terrain à cet endroit.

Le premier problème est partiellement résolu par un processus d'interpolation 2D de la phase. Les images complexes acquises dans des configurations géométriques différentes sont alignées pour maximiser le rapport S/B. Un moyennage complexe est effectué pour améliorer la lisibilité des franges (typiquement 2 pixels en distance et 10 en azimut, soit 20 "looks" [Massonnet 1992]). A l'exception du speckle, les bruits affectant l'image sont dus plus aux conditions de prise de vue qu'au radar lui-même. La maîtrise du second problème passe par l'identification des zones présentant ces discontinuités de phase et le choix d'un chemin d'intégration opportun.

Dans le cas idéal, des contours fermés d'intégration devraient donner des changements de phase nuls. La différence par rapport à zéro mesurée est appelée "résidu" : elle est principalement la conséquence de bruits locaux ou de discontinuités de "layover" (§1.3 chap.1). L'approche envisagée pour réduire le problème consiste à rompre ces chemins d'intégration dans les régions à faible rapport S/B.

### III - Limites - Contraintes d'application

#### III.1 . Limites instrumentales

##### III.1. 1 - Positionnement de la plate-forme

L'interférométrie souffre de limites théoriques sévères dans sa mise en oeuvre. L'une des limitations majeures réside dans la méconnaissance du positionnement de la plateforme sur laquelle est embarquée le SAR.

Pour l'aéroporté, les corrections apportées se basent sur les données de la centrale d'inertie embarquée dans l'avion et des systèmes de compensation du mouvement sont actuellement en développement. Le succès de la technique interférométrique en dépend. Aux équipements de navigation et de contrôle de vol classiques s'ajoutent des équipements plus sophistiqués, incluant des unités de positionnement GPS (Global Positioning System) et GPS Différentiel. Cette dernière devrait offrir une précision sur la position de l'avion inférieure à 10 m en utilisant un récepteur GPS embarqué à bord de l'appareil et 3 récepteurs au sol positionnés en des points de référence géographique. L'enregistrement correct des données exige une localisation absolue par rapport à une référence géographique existante [INTERA - Canada 1992].

Malgré les corrections effectuées à bord en temps réel qui tiennent compte des paramètres fournis par la centrale d'inertie, du bruit subsiste. Le traitement tient compte des variations de la vitesse mais ses dérivées d'ordre supérieur échappent à la mesure et créent des bruits résiduels. Il faut également souligner l'influence de la longueur d'onde sur la sensibilité de l'image aux vibrations. En bande C ( $\lambda = 5.6$  cm), une oscillation

d'amplitude de 5 mm a pour conséquence un déphasage de  $32^\circ$ !

La technique de compensation du mouvement de l'avion telle qu'elle a été adoptée par le CCRS (Canada) pour les traitements interférométriques, s'effectue en considérant une trajectoire de référence ; les données sont enregistrées comme provenant d'une position de cette trajectoire de référence. Ceci est obtenu en calculant les déplacements horizontaux et verticaux de l'antenne par rapport à la référence adoptée. La méthode suppose connue l'angle d'observation pour chaque pixel, ce qui est obtenu par défaut en adoptant une configuration de terrain plat. Si la compensation du mouvement a été correctement menée et que le terrain était effectivement plat, alors la phase de l'interférogramme serait constante. Au contraire, dans le cas de relief, les angles d'incidence utilisés pour la projection de chacun des pixels seraient erronés. En exprimant l'erreur de phase comme fonction de l'élévation du terrain pour chaque antenne, il est possible d'accéder de manière unique, en soustrayant les résultats, à la relation entre l'erreur sur les différences de phase et l'élévation de terrain (Gray-1992).

Le principal avantage de l'interférométrie spatiale par rapport à l'aéroportée est précisément lié à ce problème. En effet, le satellite offre une plus grande stabilité de par son altitude et sa vitesse, et donc une précision de positionnement meilleure. ERS1 a été équipé à cet effet de 2 instruments de détermination d'orbite précise : PRARE (Precise Range and Range-rate Equipment) et LRR (Laser Retro-Reflectors). Ces instruments ont été conçus pour le référencement des mesures altimétriques. Malheureusement, le premier instrument, PRARE, après seulement quelques heures de fonctionnement a subi des radiations qui ont engendré une panne irrémédiable. Une nouvelle version est actuellement en cours d'élaboration pour ERS-2. Les rétro-rélecteurs Laser (LRR) sont utilisés comme cibles par des stations sol pour améliorer la détermination de l'orbite du satellite en assurant la production d'un éphéméride dont la précision, pour la composante radiale, est inférieure à 0.50 m.

### III.1. 2 - Baseline

Si l'interférométrie aéroportée offre une souplesse d'utilisation dans le choix des trajectoires et des conditions d'éclairage pour un site donné, la distance entre antennes est par contre fixée et constante. Seule l'utilisation des données radar spatiales offre des combinaisons de prise de vue variables. Cette distance inter-orbites, ou "baseline", caractérise le produit interférométrique obtenu (distance inter-franges). Son choix est non seulement soumis aux caractéristiques de fonctionnement du SAR (résolution, bruit, speckle), mais aussi à celles du terrain (pente, orientation). On peut distinguer quatre niveaux intervenant dans le choix de cette baseline pour optimiser le potentiel de l'interférométrie.

#### Effet de la limitation de la résolution du SAR

Le traitement des signaux, dans le cadre d'études réalisées avec un radar à synthèse d'ouverture, nécessite la prise en compte de l'amplitude des échos, mais aussi, comme nous l'avons mentionné, de leur phase. Afin d'obtenir une information Doppler sans aucune ambiguïté, le radar émet un signal composé de plusieurs impulsions successives et les échos correspondant à autant d'impulsions différentes issues d'éléments réflecteurs de la surface, sont enregistrés et traités. Le traitement numérique comporte principalement des convolutions et transformations de Fourier.

Pour que les phases restent cohérentes et que le speckle ne change pas de façon substantielle entre les acquisitions, la baseline doit s'inscrire dans un intervalle limité par la résolution de l'instrument. Pour observer les franges d'interférences, les antennes doivent être positionnées suffisamment proches l'une de l'autre pour qu'un élément de résolution au sol produise des réflexions cohérentes au niveau des positions d'antennes. En se basant sur le principe d'échantillonnage du Théorème de Shannon appliqué à des ondes cohérentes, Gabriel et Goldstein [1988] ont montré que la distance entre les

orbites devait être suffisamment petite pour que la fréquence des franges d'interférence n'excède pas la moitié de la fréquence d'échantillonnage (fréquence de Nyquist). Autrement dit, en prenant l'exemple des images SAR-SEASAT (bande L -  $\alpha = 23^\circ$  -  $h_s = 800$  km) [Prati et Rocca 1992], une cellule de résolution de dimension  $L$  (résolution au sol) se comporte, pour le signal rétrodiffusé, comme une antenne d'ouverture angulaire  $\lambda/L$ , soit une ouverture linéaire à l'altitude de SEASAT  $h_s \cdot \lambda/L$ , d'environ 10 km. L'étude a alors montré que l'écart entre les 2 prises de vue du satellite ne devait pas excéder 5 km pour un terrain plat (et encore moins pour un terrain incliné vers l'antenne). Les satellites sont positionnés dans un faisceau correspondant à l'ouverture angulaire de l'antenne équivalente générée par la cellule de résolution au sol. Les dimensions de cette cellule dépendent de la pente du terrain.

### Influence sur la fréquence des franges d'interférences

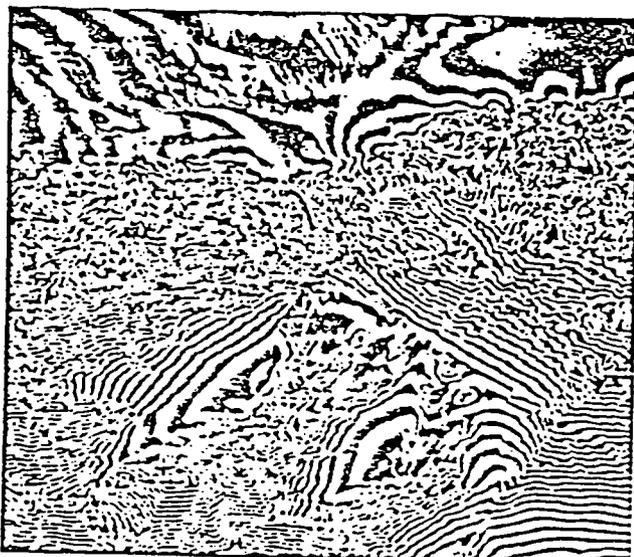
La première conséquence de l'indétermination de phase (modulo  $2\pi$ ) est la création de franges sur l'interférogramme. En effet, reprenons l'expression (9) de la différence de phase en terrain plat

$$\delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda\rho\sin\alpha} Bh_p \quad (22)$$

Limitant ces valeurs à l'intervalle  $[-\pi, +\pi]$ , il apparaît une périodicité de la mesure  $T$

$$\delta\phi = 2\pi \Rightarrow T = \frac{\lambda\rho\sin\alpha}{2B} \quad (23)$$

L'écart orbital  $B$  caractérise directement la distribution des franges en étant inversement proportionnel à la période de répétition de celles-ci. Reprenons l'exemple des données acquises par SEASAT [fig.II.9]. Dans le cas d'orbites proches ( $B=99$  m), la période observée était d'environ 400 m alors que pour une baseline plus grande ( $B=1\ 030$  m), elle était d'environ 38 m. Les franges d'interférence obtenues par combinaison d'orbites proches montrent moins de détails que celles obtenues par combinaison d'orbites lointaines.



a - baseline 1 030 m

b - baseline 99 m

fig II.9 Interférogrammes SEASAT [Prati, Rocca et al. 1990]

Effets des caractéristiques du terrain sur le choix de la baseline

La configuration du terrain imagé, les propriétés inhérentes des sites étudiés, sont autant d'indicateurs pour un choix de baseline optimale. L'expression de la différence de phase dans le cas d'un terrain de pente constante  $\alpha'$  est fonction de l'angle de pente (mesuré par rapport à l'horizontale) et de la baseline. On observe, dans le cas de fort relief ( $\alpha'$  tend vers  $\alpha$ ) une divergence de l'expression due au terme  $\sin(\alpha' - \alpha)$  présent au dénominateur. La pente maximale que l'on peut espérer mesurer est inférieure à l'angle d'incidence ( $\alpha = 23^\circ$  dans le cas d'ERS1). En pratique, l'erreur d'échantillonnage de phase ("phase aliasing") est observée pour des pentes de terrain inférieures, variables selon la baseline d'observation et pouvant faire apparaître des changements abrupts de terrain n'ayant aucune signification physique.

Par ailleurs, la résolution au sol  $L$ , définie par  $L = r_d / \sin(\alpha' - \alpha)$  où  $r_d$  est la résolution en distance du SAR, tend vers l'infini pour un angle de pente  $\alpha'$  proche de  $\alpha$ . Autrement dit, la cellule de résolution rayonne un faisceau d'ouverture angulaire nulle ( $\beta = \lambda/L$ ) d'où une perte de cohérence entre les 2 images. Ces effets ont été observés dans le cadre de l'étude interférométrique à partir de données SEASAT ( $\alpha = 23^\circ$ ). Ils sont résumés fig.II.10 .

$\alpha'$	baseline 99 m	baseline 1 030 m
perte de cohérence	22.8°	21.0°
phase aliasing	22.2°	15.2°

fig.II.10 Contraintes d'utilisation - données SEASAT [Prati & Rocca 1990]

Il apparaît à la vue de ces résultats que le choix d'une baseline plus petite est plus opportun puisque les effets perturbateurs interviennent plus tard. Cependant, le choix d'une baseline optimale est soumis à d'autres contraintes techniques (bruit, non-conservation du speckle), ayant des effets inversés, et nécessitant ainsi un compromis à réaliser afin d'obtenir la meilleure combinaison interférométrique possible.

Effets du bruit

Comme dans tout système imageur cohérent, l'imagerie SAR est altérée par le phénomène de speckle. Cependant, il est important de noter qu'en matière d'interférométrie, le speckle n'est pas, à proprement parler, un "bruit". Dans la mesure où il se conserve, il crée la cohérence. Il ne devient source de bruit que dans la mesure où il n'est pas reproductible entre les différentes acquisitions.

La détermination de la résolution altimétrique dépend à la fois de la présence du speckle et du bruit additif. Prati et Rocca [1990] ont évalué l'erreur altimétrique induite successivement par chacun de ces effets.

L'écart-type d'erreur du bruit de scintillement est constant dans l'approximation du premier ordre. Les résultats expérimentaux ont montré que les franges sont plus affectées par le bruit additif dans le cas d'orbites proches que par le speckle. Au contraire, si l'écart orbital augmente, la contribution du bruit due au speckle sera amplifiée alors que celle liée au bruit additif sera moins importante. D'où un compromis à établir entre les contributions respectives de chacun de ces bruits, l'évolution de la baseline induisant des effets inversés sur chacune de ces deux contraintes. Dans le cas d'un terrain à faible rugosité, la résolution altimétrique d'un tel système s'améliore lorsque la baseline augmente. La baseline critique (limitée par la conservation du speckle)

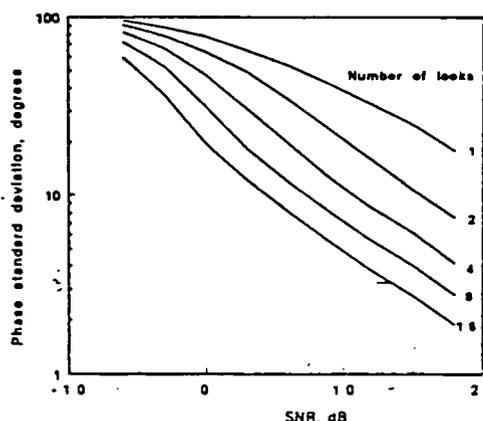
croît avec la résolution spatiale de l'image SAR. De manière générale, la démarche proposée pour l'estimation du bruit (estimation de la résolution altimétrique) consiste à soustraire à l'image haute résolution (orbites lointaines) filtrée passe-bas, l'image basse résolution (orbites proches).

### Conclusion

Le choix de l'écart orbital est un paramètre primordial de l'interférométrie à la fois pour l'obtention d'un interférogramme fiable, caractéristique du terrain imagé, et pour l'interprétation qui en sera faite.

La baseline optimale dépend avant tout de la pente du terrain et dans la perspective d'obtenir une carte d'élévation de terrain, il est souhaitable d'avoir plusieurs combinaisons d'écart orbitaux afin de s'affranchir d'un maximum de contraintes liées à chacune de ces valeurs. Pour un relief faible et modéré, une distance inter-orbitale élevée semble conseillée alors qu'un relief plus prononcé, plus accidenté, rendrait opportun le choix d'une baseline plus courte. Enfin, le rapport signal-sur-bruit (S/B) du capteur influence directement le choix de la baseline. Il n'y a aucun moyen de mesurer des différences de phases si la réflectivité et si le rapport S/B sont trop faibles. La fig.II.11 donne une estimation de l'erreur de phase comme fonction du rapport S/B et du nombre de looks (moyennage complexe des pixels) pour un interféromètre radar.

fig.II.11 Erreur de phase en fonction du rapport signal/bruit (dB) et du nombre de looks pour l'interféromètre aéroporté TOPSAR (baseline 2.58m) [Zebker et al 1992]



### III.2 - autres contraintes

D'autres critères relatifs à la configuration orbitale, à la géométrie de visée des instruments et au terrain peuvent modifier les franges. La précision des mesures et leur validation est au prix d'une modélisation très fine incluant tous les paramètres pouvant influencer directement l'interférogramme.

L'extension des images satellites (~100 km) nécessite la prise en compte de la variation de la géométrie de visée le long de la scène (pour ERS1, l'angle d'incidence varie de 20.1° à 25.9° d'un bord à l'autre de la scène) et de l'évolution du rayon terrestre (modèle ellipsoïdal terrestre), qui l'un comme l'autre peuvent engendrer des erreurs altimétriques importantes. Pour un radar aéroporté, il n'est pas nécessaire de considérer la forme ellipsoïdale de la Terre, le modèle sphérique suffit. Pour les radars satellitaires qui couvrent une plus large scène, l'erreur induite par le rayon de courbure de la Terre devient considérable, précisément pour des angles d'incidence élevés. Les paramètres orbitaux (inclinaison, altitude sensiblement variable selon les cycles du satellite), l'écart de parallélisme des orbites et les vibrations de l'instrument doivent également être considérés.

Enfin, il faut souligner la sensibilité du signal aux fluctuations d'épaisseur atmosphérique et les délais de propagation créés par les variations de la vitesse de la lumière avec les conditions ionosphériques et atmosphériques. Comme nous l'avons fait remarquer en

introduction, les micro-ondes appartiennent à une région du spectre électromagnétique pour laquelle l'atmosphère terrestre est quasi-transparente. Cependant, la grande précision de la technique interférométrique nécessite la prise en compte des effets perturbateurs qui pourraient apparaître au cours de la propagation des micro-ondes (brouillard, nuage, pluie, neige). Une modélisation du coefficient d'atténuation pour les fréquences comprises entre 1 et 100 GHz a été proposée en fonction de la densité en eau des nuages [Ulaby et al. 1981]. Les longueurs d'onde sont d'autant moins affectées par les perturbations qu'elles sont longues. Des données radar acquises en bande L (25 cm) traversent parfaitement pluie et nuages. Par contre, en bande X (3 cm), les effets d'une forte pluie ont été observés [Leberl 1990] et en bande K (0.8 cm), les nuages peuvent même devenir visibles.

Les corrections géométriques peuvent aussi être nécessaire pour la réfraction atmosphérique, particulièrement dans le cadre d'imagerie satellitaire haute résolution. La décroissance de la densité atmosphérique avec l'altitude crée une courbure des rayons vers la surface terrestre [fig.II.12]. Pour les observations satellitaires, sous des angles d'incidence inférieurs à 45°, l'écart  $\delta x$  observé est estimé par

$$\delta x \cong 2.5 \sin \theta (\cos \theta)^{-4.5} \text{ mètres (24)}$$

[ Moccia & Vetrella 1986 ]

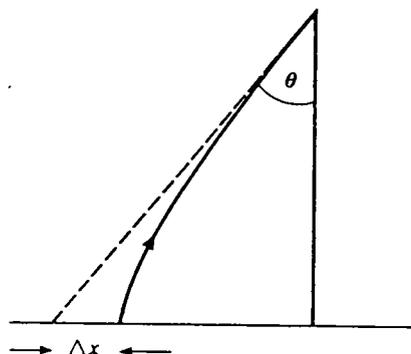


fig.II.12 Réfraction des rayons à la traversée de l'atmosphère

#### IV - Evaluation du degré de cohérence du produit interférométrique

##### IV. 1 - Introduction

La différence de phase introduite en interférométrie nécessite une corrélation suffisante entre les données acquises par le satellite au cours des cycles d'observation. La principale conséquence de la décorrélation sur l'interférogramme est le bruit qui vient s'ajouter aux signaux rétrodiffusés, accroissant l'écart-type d'erreur sur l'estimation des phases, et donc sur les valeurs altimétriques qui peuvent en être déduites.

Différentes notions de cohérence ont été comparées du point de vue de leur signification thématique et de la facilité de calcul par le CNES. Les résultats les ont amenés à changer la notion de cohérence utilisée jusqu'alors et à établir des critères macroscopiques de cohérence [Massonnet 1993].

Zebker & Villasenor [1992] ont évalué l'erreur de phase comme fonction des facteurs de décorrélation du système radar et du nombre de looks (fig.II.13). Il en ressort que l'augmentation du nombre d'éléments de résolution moyennés spatialement dans l'interférogramme complexe pour réduire les variations statistiques permet d'améliorer considérablement la précision des mesures (au détriment de la résolution spatiale).

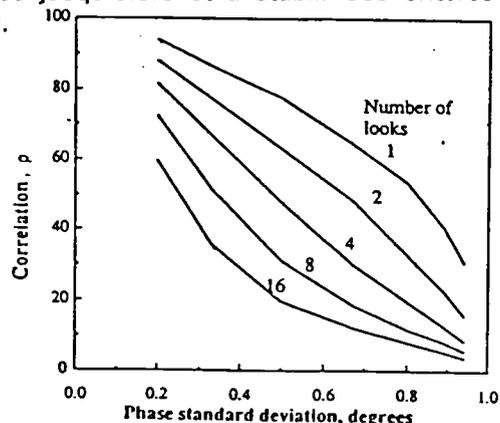


fig.II.13 Erreur de phase en fonction du degré de corrélation et du nombre de looks

[Zebker & Villasenor 1992]

**Enjeu pour notre étude :**

Il apparaît important de développer ce point dans la perspective fixée de détection de mouvements par interférométrie différentielle (chapitre III). En effet, l'observation d'une perte de cohérence partielle d'une même scène observée à des dates différentes permet la mise en évidence des changements des caractéristiques de la surface diffusante. L'évolution du terrain au cours de la période d'observation peut ainsi être quantifiée par les variations statistiques des mesures de phase d'un petit nombre de pixels. A l'inverse, l'étude précédemment citée préfigure les limitations de la technique différentielle.

**IV. 2 - Identification des différentes sources de décorrélation**

Les échos radar sont corrélés lorsqu'ils représentent la même interaction, le même speckle. Leur décorrélation signifie un changement dans la géométrie d'observation ou dans la position relative apparente des diffuseurs. Il s'agit de caractériser ici les différentes sources de décorrélation des échos, et d'isoler les termes qui décrivent plus particulièrement des changements surfaciques. L'évaluation des facteurs de décorrélation est importante pour au moins deux raisons:

- lever une source d'erreur importante en cartographie radar à partir de passages orbitaux multiples,
- mesurer les changements de surface et décrire les processus se produisant à l'échelle temporelle du cycle orbital et spatiale de la longueur d'onde radar.

L'étude proposée par Zebker & Villasenor [1992] recense 4 principales sources de décorrélation : thermique, spatiale, rotationnelle et temporelle, dues respectivement au bruit thermique inhérent au SAR utilisé, à l'écart entre orbites, aux changements de surface entre les dates de prises de vue, à une rotation de la cible. L'objectif est d'isoler la contribution de chacune de ces sources à la décorrélation totale, en développant des relations de transformée de Fourier entre la réponse impulsionnelle du radar et les fonctions de corrélation, et séparer les effets de décorrélation temporelle (changement effectif de la cible) et spatiale (dépendant de la géométrie du capteur). Les coefficients de corrélation sont établis en approximant la réponse impulsionnelle du radar par un produit de sinus cardinaux dans les directions azimutale et transversale, et les mouvements de surface à des distributions de probabilité Gaussienne.

**IV. 3 - Evaluation des contributions respectives : les acquis expérimentaux.**

La comparaison des estimations théoriques aux valeurs expérimentales issues de données SEASAT présentent plusieurs enseignements.

Le coefficient de corrélation relatif au bruit thermique est proportionnel au rapport signal-sur-bruit. Ainsi, pour des surfaces à forte rugosité, arides, où la rétrodiffusion est importante, la décorrélation thermique observée sera minimale.

Le coefficient de corrélation spatiale, pour 2 positions de l'antenne présentant un écart relatif entre les angles de visée, décroît linéairement avec cette dernière valeur. Il a été évalué sur terrain aride et rugueux (minimisant les risques de décorrélation temporelle et thermique). Pour un point donné de la scène, la différence entre les angles de visée, pour chacun des enregistrements, introduit un facteur de décorrélation, d'autant plus fort que la baseline est grande. Quand la surface, constituée d'une distribution de plusieurs cibles diffusantes, est observée sous des angles différents, la sommation cohérente des phases n'est plus la même. En aéroporté, une même scène est observée par les 2 antennes (baseline = 11 m) sous des angles pouvant différer de  $0.03^\circ$ , inférieur à l'écart de décorrélation fixé à  $1^\circ$ . En interférométrie satellitaire, la baseline synthétisée par l'écart

d'orbites est plus grande (de quelques dizaines de mètres à 1 000 m) et engendre une décorrélation conséquente [fig.II.14.a]. On peut définir une valeur critique de baseline annulant le coefficient et correspondant à une variation d'angle de visée entre les 2 passages suffisante pour provoquer une rétrodiffusion entre chaque pixel complètement décorrélée. Il s'agit ici d'une décorrélation entre les échos due uniquement au changement de condition d'observation. Cette valeur critique de baseline s'ajoute aux critères de choix d'une baseline optimale développés § III.1.2 .

Les résultats de simulation obtenus [fig.II.14.b] indiquent une décorrélation des signaux avec l'angle, mais surtout il est intéressant de constater que la valeur de la longueur d'onde utilisée influe directement sur les mesures de corrélation. Les signaux sont complètement décorrélés après une rotation de la cible de  $2.8^\circ$  en bande L (24 cm) et  $0.7^\circ$  en bande C (5.6 cm). Les signaux se décorrèlent d'autant plus vite que la longueur d'onde radar est courte.

Enfin, la décorrélation temporelle nécessite la prise en compte d'une variabilité tri-dimensionnelle de la fonction de rétrodiffusion. Deux cas de figures se présentent :

soit on considère que les diffuseurs bougent ensemble dans une direction préférentielle ; on observera un écart de phase systématique au lieu d'une décorrélation. L'idée a été proposée et appliquée à la mesure de petits changements de surface [Gabriel & Goldstein 1989, Massonnet 1993] ;

soit on considère des mouvements aléatoires où chaque centre diffuseur bouge indépendamment des autres. C'est cette dernière hypothèse qui servira de principe de base à la simulation.

L'expression du coefficient de corrélation temporelle évoque 2 remarques importantes:

$$\rho_{temp.} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2(\sigma_y^2 \sin^2 \theta + \sigma_z^2 \cos^2 \theta)\right) \quad (25)$$

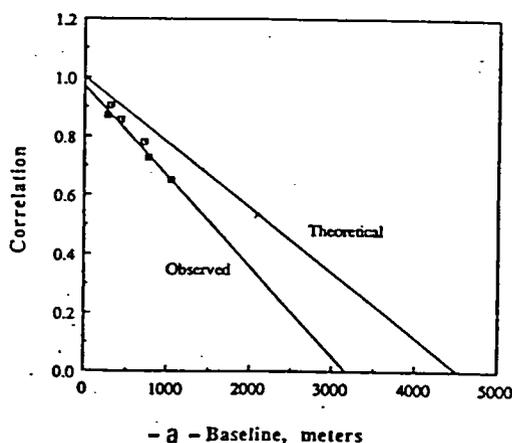
$\sigma_y$  : variation horizontale du mouvement

$\sigma_z$  : " verticale

La première remarque concerne le dernier terme de l'expression. Il indique une sensibilité plus grande aux mouvements verticaux qu'aux mouvements horizontaux, et ce pour des incidences inférieures à  $45^\circ$ .

La seconde remarque concerne la longueur d'onde et rejoint l'observation déjà faite pour la décorrélation rotationnelle. Les simulations font état d'une décorrélation complète des signaux après un mouvement d'amplitude 10 cm en bande L contre seulement 2-3 cm en bande C, c'est-à-dire de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde radar !

La série d'interférogrammes établie à partir des données SEASAT pour 3 régions à couvert végétal différent (vallée désertique, région de laves à la végétation quasi-inexistante et région très forestière), observées sur une période de 18 jours, conforte en partie les prévisions [fig.II.14.c]. Le sol désertique ne présente aucune décorrélation significative sur la période d'observation. Ce résultat permet de vérifier, en outre, que les autres sources d'erreur ont été correctement éliminées. Sur la zone boisée, la décorrélation est quasi-linéaire. La variation du speckle provoquée par l'évolution du sommet du couvert végétal



en est le principal facteur. L'explication du phénomène de décorrélation observé sur la région volcanique, où le sol est recouvert de laves à nu, sans végétation, reste pour sa part hypothétique (expansion du sol, autre source d'erreur non prise en compte,...).

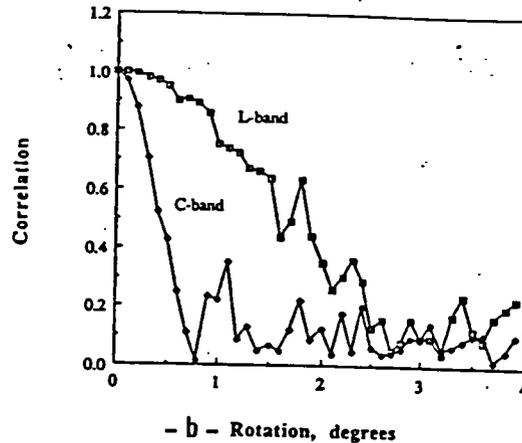
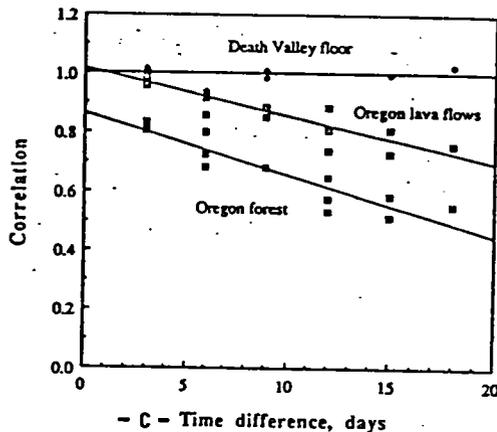


fig.II.14 a,b,c Décorrélation interférométrique [Zebker & Villasenor 1992]

## V - Résultats obtenus et perspectives

### V . 1 - Précision altimétrique

L'interférométrie, notamment depuis les résultats obtenus à partir des données SEASAT, a montré sa capacité à la cartographie. Il est important, bien sûr, que la surface reste inchangée sur la période d'observation. La précision sur les hauteurs estimées dépendra de la cohérence de la scène. Selon le modèle développé par Li & Goldstein [1990], l'erreur sur la mesure de phase pour des cibles distribuées dépend du rapport signal-sur-bruit, du nombre de looks, de la séparation angulaire d'antennes, de la résolution en distance, de l'angle de visée et de la longueur d'onde. A tous ces facteurs viennent s'ajouter les caractéristiques du terrain, le relief, et ses conséquences sur les conditions optimum d'éclairage (effet d'ombre et de Layover). Enfin toute erreur dans le processus de déroulement de phase mène irrémédiablement à des erreurs d'estimation altimétrique, d'où l'intérêt d'aboutir à un algorithme performant.

Les erreurs de phase induites par la présence du bruit, du speckle, du mouvement non compensé de la plateforme, par un mouvement des diffuseurs, pour une baseline donnée, ont été principalement évaluées par simulation pour des configurations proches de celles rencontrées en interférométrie aéroportée [Cumming - Hawkins - Gray - 1990]. Les modèles ont permis d'évaluer individuellement la contribution de chacun à l'erreur globale d'estimation altimétrique du terrain. Ainsi, l'écart-type d'erreur, évalué individuellement, est de l'ordre de 1-4 m. Quand les sources d'erreur sont combinées, il est de l'ordre de 3-9 m, selon la distance antenne-cible (milieu ou bord de scène) et le rapport S/B. L'écart-type est d'autant plus élevé (2.5 m à 7 m) que l'on se place à des distances antennes - cibles plus grandes (1 000-3 000 m à 5 000-8 000 m). La précision avancée par le CCRS pour les MNT obtenus par interférométrie aéroportée, est de l'ordre de 5 m, dans des situations à faible relief. La précision altimétrique atteinte à partir des données ERS1 est inférieure à 10 m (précision à 5 m pour les MNT CNES/ISTAR). De récents travaux menés sur l'Alaska ont permis la réalisation d'un MNT avec un écart-type d'erreur de 4 m !

L'utilisation de réflecteurs radar ("cornets réflecteurs") permet une amélioration considérable des résultats. Leur configuration, et particulièrement le rapport S/B élevé qui les caractérise, offre une garantie de cohérence de phase et la possibilité de corriger les erreurs de phase occasionnées par l'extension des cellules élémentaires de diffusion. Dans la mesure où leurs positions relatives auraient été au préalable parfaitement définies, on peut envisager la possibilité de remonter aux paramètres d'orbitographie ou de mouvement de l'avion. Organisés en réseau, les réflecteurs radar offrent enfin la possibilité de détecter les mouvements de la surface sur laquelle ils ont été positionnés, dans les directions radiale et azimutale [Prati & Rocca - 1990].

## V . 2 - Evolution - Perspectives

### V .2.1 rappel historique

La première description de l'interférométrie radar aéroportée a été effectuée par L.C.Graham de Goodyear Aerospace [1974]. Historiquement, la technologie interférométrique résultait de l'observation de planètes (Vénus) et de la Lune à partir de la Terre [Rogers & Ingalls, 1969 ; Goldstein, 1965]. Les travaux furent abandonnés et aucune publication ne fit référence à la technique d'interférométrie, jusqu'à ce que le JPL (Jet Propulsion Laboratory) commence ses études en 1985. La plupart des travaux ont été stimulés par les progrès des données SAR et sont, de ce fait, relativement récents [Massonnet-1985, Li & Goldstein-1987]. Les premières cartes topographiques réalisées à partir des données interférométriques par l'équipe américaine du JPL ont été réalisées avec l'aide d'un interféromètre radar à synthèse d'ouverture monté sur CV990 de la NASA (bande L ; baseline = 11 m). Les résultats des campagnes aéroportées font état d'un écart-type d'erreur de 2-10 m sur les mesures d'élévation effectuées sur l'océan, et un peu plus pour les points terrestres isolés [Zebker & Goldstein 1986]. L'erreur globale de l'ordre de 10 m résultait essentiellement d'une méconnaissance du positionnement et du mouvement de l'appareil.

### V .2.2 Interférométrie aéroportée

La technique connaît actuellement de nouveaux développements grâce à l'acquisition de données AirSAR interférométriques (bande C - interféromètre 2 antennes monté sur DC8 de la NASA). Nous citerons plus particulièrement les travaux entrepris par l'équipe du CCRS (Canada Centre for Remote Sensing) concernant l'interférométrie aéroportée [Gray 1989/1993].

Les données complexes sont acquises par des SAR bandes C ou X, multipolarisation (HH et HV ou VV et VH), avec 3 possibilités de configuration géométriques de prise de vue et 2 résolutions possibles (6m×6m ou 20m×10m), montés sur Convair-580 (sous contrat avec Innotech Aviation et Intera). Les premiers travaux (1990) ont montré qu'il était possible d'observer des interférences à partir de combinaison d'images SAR aéroportées issues de trajectoires différentes, survolant le même site. L'interférométrie à passages répétés débouche sur des études de cohérence temporelle et des expériences d'interférométrie différentielle, avec toute la souplesse d'utilisation qu'offre l'avion. L'évaluation du mouvement d'un réflecteur radar avec une précision de l'ordre du millimètre a renforcé l'espoir que suscite cette technique (chapitre III).

Les résultats encourageants obtenus lors des premières expérimentations ont conduit à l'implantation d'un premier interféromètre (7/1991) constitué de 2 antennes placées perpendiculairement à la trajectoire, permettant l'enregistrement simultané des échos et la mesure de l'altitude de la cible. La précision annoncée fait état d'un écart-type d'erreur de 1.5 m à 5 m [Gray 1993]. L'utilisation de points de contrôle terrain ou d'un système de positionnement différentiel GPS permet d'améliorer la précision. Actuellement, les travaux s'orientent vers l'évaluation de MNT sur des reliefs plus prononcés (Canadian Rockies).

Un nouvel interféromètre est programmé pour 1993 ; constitué d'une structure double antenne disposée le long de l'axe de l'appareil, il devrait permettre de mesurer la composante de la vitesse des cibles selon la direction antenne / cible. L'ensemble de ces expérimentations s'inscrit dans le cadre du programme d'études préalables au lancement du satellite RADARSAT prévu pour 1994.

### V .2.3 Interférométrie satellitaire

Une alternative à la séparation d'antennes utilisant 2 capteurs distincts montés sur une seule plateforme est l'utilisation de passages orbitaux séquentiels d'un satellite SAR et la combinaison des images à partir d'orbites séparées. Les premiers résultats obtenus avec les données SEASAT et SIR-B [Li & Goldstein, Zebker, Werner, Gabriel, Massonnet, Prati & Rocca] ont confirmé l'intérêt de ce type de données pour la cartographie.

Les images radar délivrées par les navettes spatiales américaines (notamment les données SIR-B en 1984) ont permis d'envisager une approche quelque peu différente de l'interférométrie, à partir d'orbites croisées [JPL 1988, CNES 1993]. Une seule antenne montée sur le satellite est utilisée, avec des orbites quasi-répétitives. La baseline est synthétisée en reliant les signaux radar des différents passages au dessus d'une même scène. Si le terrain ne subit aucune déformation pouvant entraîner une perte de cohérence, alors les signaux restent très fortement corrélés au cours de la période d'acquisition. Les premiers travaux ont été menés dans le cadre des projets SEASAT.

Le lancement d'ERS1 en 1991 a marqué un nouvel essor de la technique interférométrique. La stabilité du SAR d'ERS1 et la répétitivité de ses orbites autorisent l'utilisation quasi-systématique de l'information de phase contenue dans les signaux radar rétrodiffusés. Cela signifie que le traitement interférométrique d'images radar successives d'une même scène offrira une source d'information complémentaire des images SAR classiques. La définition d'un produit interférométrique standard, tel que celui mis à la disposition des industriels par le CNES, devrait permettre l'intégration aisée de l'interférométrie dans les procédures de calcul de relief spécialisées. L'implantation des interférogrammes dans des chaînes opérationnelles de calcul des MNT, telles que celles de la société ISTAR, s'avère très encourageante : précision inférieure à 5 m.

Les résultats obtenus avec des images du SAR d'ERS1 sur l'Alaska ont montré que l'erreur sur l'élévation estimée des points imagés était inférieure à 4 m, et cela sans lissage ou autre traitement du signal réduisant le bruit. Enfin JERS1 (bande L) et bientôt RADARSAT (bande C) devraient permettre de poursuivre les investigations dans les années à venir.

## VI - AUTRES TECHNIQUES INTERFEROMETRIQUES

### VI . 1 - Interférométrie à balayage le long de la trace (Along-Track Interferometry)

Nous mentionnerons ici l'existence d'une classe d'interféromètres radar spécialement conçus pour mesurer les différences de phase entre échos séparés en temps par moins d'une seconde. Cette technique autorise, à partir d'interféromètres aéroportés, la mesure des mouvements de surface océanique tels les courants, les remous laissés derrière les navires ou les spectres de vagues. Il ne s'agit pas de mesurer la hauteur exacte de chaque pixel, mais d'estimer l'écart-type des hauteurs sur une zone de plusieurs pixels. La particularité des mesures repose sur le traitement du phénomène de décorrélation de la surface des océans, différent de celui observé sur les terres émergées.

L'interféromètre (ATI, Along-Track Interferometer) est constitué de 2 antennes disposées horizontalement, parallèlement à la trajectoire de l'avion, aux extrémités du fuselage (2 de ces systèmes sont utilisés par le JPL - JPL AIRSAR System - en bande L et C depuis

1991). Leur fonctionnement repose sur le principe suivant : les deux antennes voient le même pixel à des temps légèrement différents. Si le pixel ne subit aucune modification, les phases associées aux échos retour seront identiques. Si au contraire, le pixel subit une modification, les phases seront différentes. Dans la mesure où le changement est provoqué par un mouvement vers l'avion d'une distance inférieure à  $\lambda/2$ , la différence de phase sera directement liée à la vitesse du mouvement.

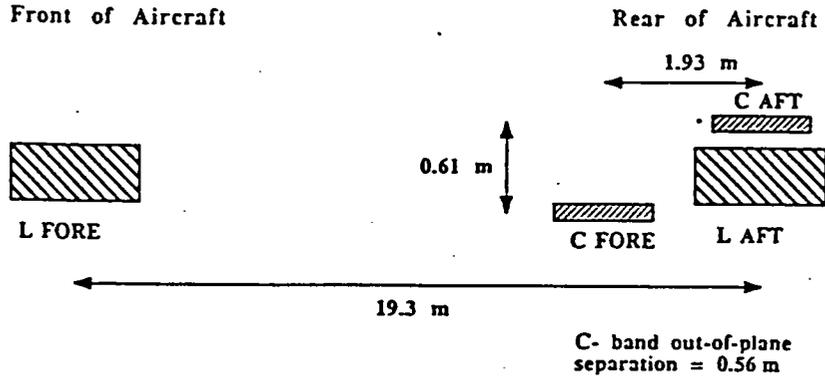


fig.II.15 Géométrie des antennes du système ATI [ Carande et al. 1991]

## VI.2 - Tethered interferometry

Cette nouvelle conception de l'interférométrie spatiale constitue en quelque sorte un compromis entre les techniques aéroportées et spatiales précédemment exposées. L'instrument est constitué de 2 antennes séparées verticalement, reliées par un "bras" et décrivant des trajectoires parallèles. Plusieurs modèles spatiaux élaborés selon ce principe ont déjà été proposés ou sont à l'étude pour être déployés à partir de stations futures : projet Italiano-Américain - Tethered Satellite System - dont le lancement devait être effectué par la navette spatiale américaine en 1992 [Moccia & Vetrella 1992]. Un tel instrument offre l'opportunité d'une baseline variable et d'une observation simultanée (excluant le phénomène de décorrélation temporelle). Les expériences de simulation effectuées révèlent que l'interféromètre SAR spatial avec 2 antennes séparées verticalement pourrait être un instrument de cartographie potentiel à l'échelle terrestre, en permettant de satisfaire de nombreuses exigences d'utilisateurs de MNT.

Cependant, les contraintes techniques auxquelles il est soumis amènent des restrictions. La longueur du "bras" est limitée en pratique pour des raisons technologiques et nécessiterait l'utilisation de courtes longueurs d'onde pour avoir un écart-type d'erreur sur les mesures planimétriques compatible avec l'échelle et une utilisation cartographique. A l'échelle du 1/50 000, une baseline de 100m en bande X ou de 1 000m en bande L satisfèrait ces conditions. Par ailleurs, les oscillations de la structure de l'instrument créent une haute fréquence de vibration parasite, d'amplitude comparable à  $\lambda$ , d'autant plus difficile à maîtriser que le gradient de gravité est faible pour des baselines courtes.

Le lancement du système Italiano-Américain par la navette, en 1992, s'est avéré un échec: le déploiement du bras n'a pas pu s'effectuer.

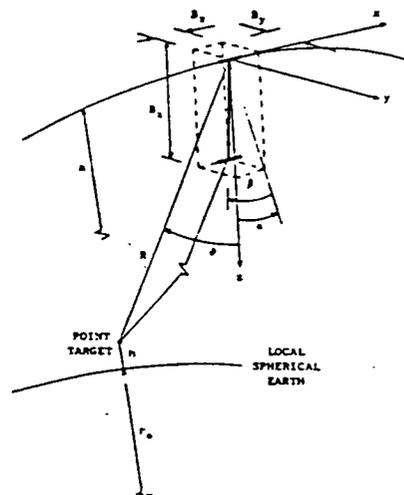


fig.II.16 Géométrie de l'interféromètre



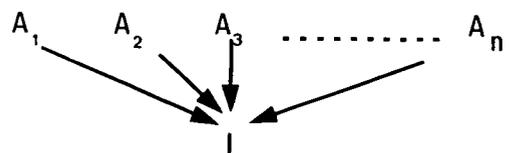
prétendre évaluer l'amplitude du mouvement que dans la direction antenne/cible. Seules plusieurs combinaisons permettraient d'accéder à la connaissance complète du mouvement (amplitude et direction). La procédure est un peu différente lorsqu'on dispose d'un MNT de la scène. Les changements de phase sont obtenus en soustrayant les franges de l'interférogramme réel ( $I_1$  ou  $I_2$ ) à celles calculées pour le relief donné et pour la configuration de prise de vue proposée [CNES]. Enfin, l'acquisition d'un couple de données présentant un écart orbital très court peut offrir l'opportunité d'un produit interférométrique différentiel dans la mesure où les effets de relief sont alors négligeables [Prati et al 1993]

Le produit se présente comme une image à 3 canaux [Massonnet 1992]. Le premier contient l'information d'amplitude relative aux caractéristiques de rétrodiffusion de la cible. Le second contient l'information de phase, issue du "double-interférogramme". Enfin, un indicateur de cohérence des mesures (3ème canal) donne le degré de fiabilité de la mesure de phase entre les différentes acquisitions. Ces 3 informations sont regroupées dans l'interférogramme et caractérisées sur l'image respectivement par l'intensité, la teinte et la saturation (la perte de cohérence apparaît en noir ou blanc).

Si la trajectoire s'était répétée exactement, seulement 2 observations auraient été nécessaires pour détecter les changements. L'écart entre les orbites fait que les changements à la surface deviennent indissociables de l'information topographique, nécessitant une troisième observation. Celle-ci, faite pour une baseline différente, permet de s'affranchir de la topographie en ne conservant que les changements de surface. A priori, il n'est pas possible de préciser si les changements intervenus se sont produits entre ( $t_2-t_1$ ) ou ( $t_3-t_2$ ) sans avoir connaissance d'une mesure indépendante : soit une 4ème observation, soit un MNT, soit un suivi au sol.

Enfin, signalons que l'interférométrie aéroportée devrait permettre à son tour l'observation de phénomènes liés à des changements altimétriques de surface. L'expérience proposée par le CCRS [Gray 1993] a démontré que l'interférence pouvait être observée en combinant de manière cohérente les images SAR aéroportées (bande X ou C) enregistrées au cours de différents survols d'un même site test, et ce, dans la mesure où chaque cellule de résolution est observée sous des conditions géométriques de visée quasi-identiques [fig III.2]. La principale difficulté d'application de l'interférométrie "multi-pass" aéroportée par rapport à l'interférométrie différentielle satellitaire, réside dans la procédure de compensation du mouvement de la plateforme.

ACQUISITIONS.....



INTERFEROGRAMMES.....

fig II.18 Interférométrie "multi-pass"

La démarche d'interférométrie "multi-pass" proposée a été appliquée à la mesure d'un déplacement de cornet réflecteur (fort SNR) dans un environnement sans relief, avec des écarts de temps très courts entre les prises de vue (inférieurs à la journée). Dans ce cas, seules deux acquisitions suffisent pour évaluer le mouvement de la cible radar.

## I.2 - Potentialités

La théorie a été développée par les équipes du CNES [Massonnet 1985] et du JPL [Gabriel, Goldstein & Zebker 1989].

Les techniques d'interférométrie différentielle font l'objet d'études actives au CNES

depuis plusieurs années. L'étude du site d'un tremblement de Terre (1992, Landers, Californie, USA) a permis de vérifier les possibilités de détection de faibles mouvements du sol [Massonnet 1993]. Les procédures de traitement mises en place au CNES ont permis d'établir une carte des mouvements sismiques éprouvés à l'occasion du séisme, sans prise de point d'appui spécifique, et sans qu'il soit nécessaire de disposer de cibles artificielles dans l'image (technique de "verrouillage" par l'image).

Les résultats expérimentaux obtenus à partir de données SEASAT-SAR sur des zones cultivées plates ont permis de confronter les prédictions. Les résultats sont exemplaires et suscitent plusieurs remarques.

Il apparaît que les variations de phase ne sont détectables que dans la mesure où les changements occasionnés ne modifient pas la structure de la surface mais opèrent uniquement une déformation relative en distance. Les caractéristiques de rétrodiffusion du terrain ne doivent pas être altérées entre les acquisitions, pour que les différences de phase mesurées entre les 2 images complexes, issues d'enregistrements différents, ne soient pas aléatoires mais effectivement reliées à un écart relatif de distance entre l'antenne et la cellule. Par exemple, pour les champs moissonnés ou labourés entre les observations, le changement de surface occasionné est tel que les signaux ne sont plus corrélés et leurs phases incohérentes.

L'évolution des caractéristiques hydriques des sols est par contre théoriquement détectable : gonflement après arrosage ou contraction des sols en saison sèche. Cependant, il me paraît dans ce cas difficile d'avancer une interprétation altimétrique des phases dans la mesure où le changement de phase enregistré dans le double-interférogramme peut être relié non seulement aux variations altimétriques des sols, mais aussi aux variations des propriétés radioélectriques des cibles..... (§1.2 chapitre 2)

Il est bien entendu que les contraintes d'utilisation et les restrictions concernant les paramètres instrumentaux et géométriques de l'interférométrie, mentionnées § 11.4, s'appliquent à la méthode différentielle. Ajoutons que les conditions nécessaires à la cohérence mutuelle entre les jeux de données imposent que toutes les observations se fassent dans la même ouverture angulaire, correspondant au rayonnement de la cellule élémentaire de résolution.

### **1.3 - Applications à la détection de mouvements de terrain**

Les premiers résultats ont en effet indiqué que la technique pouvait permettre la détection de mouvements locaux à la surface de la Terre, avec une précision centimétrique. L'illustration en a été faite par voie aéroportée et par voie satellitaire.

Les expérimentations menées par le CCRS en matière d'interférométrie aéroportée "multi-pass", à partir de combinaisons issues de 4 passages au dessus d'une même scène, ont montré une perte de cohérence en bande C et X pour les zones forestières en présence de vents légers à modérés. Elles ont démontré la possibilité de mesurer des mouvements de réflecteurs radar avec une précision millimétrique [erreur moyenne  $\sim 1.1$  mm].

L'interférométrie SAR est explorée par de nombreux utilisateurs d'ERS1, car elle ouvre la porte à diverses applications. Les expérimentations ont été menées notamment avec des cibles radar déterminées (cornets réflecteurs) pour lesquelles il a été possible de mesurer sans ambiguïté leurs déplacements verticaux jusqu'à 9 mm ("expérience de Bonn" menée conjointement par l'Institut pour la Navigation de l'Université de Stuttgart et l'Institut Polytechnique de Milan). Plusieurs expériences sont en cours pour évaluer de très faibles mouvements de surface, sans l'aide de cornets réflecteurs.

L'utilisation du radar à la surveillance des mouvements de terrain semble tout-à-fait appropriée puisque la bande de fréquence sélectionnée lui permet de s'affranchir des

contraintes atmosphériques et climatiques, ce qui réduit les délais d'attente des images (qui peuvent être de plusieurs mois pour SPOT) et permet un suivi continu. Par ailleurs, les cycles de répétitivité des orbites (3 ou 35 jours pour ERS1) offrent une surveillance continue et généralement compatible avec l'échelle temporelle des phénomènes observés.

L'automatisme qui devrait permettre cette rapidité de traitement est aussi le gage de l'homogénéité des informations obtenues, alors que le nombre important d'intermédiaires nécessaires à l'exploitation de MNT à différentes dates, de clichés aériens, etc..., est un risque de discordance dans la traduction d'un même phénomène.

**ANNEXE 1****ERS1 - Instruments*****AMI ( Active Micro-wave Instrument )***

détecteur actif à hyperfréquence :

- \* radar à synthèse d'ouverture ( *SAR* ) en bande C fonctionnant en mode image ou mode vague
- \* un diffusionmètre vent ( *Wind Scatterometer - WNS* )( mesure de la vitesse et de la direction des vents à la surface de l'océan).

***RA (Radar Altimeter )***

altimètre radar ; mesure précise du temps retour des échos radar ( bande Ku ) au dessus des mers, océans, glaces et détermination des hauteurs de vague, vent de surface, élévation de la mer, glaces de mer,....

***ATSR ( Along-Track Scanning Radiometer )***

radiomètre à balayage le long de la trace avec sondeur à hyperfréquences :

- \* radiomètre infra-rouge ( *IRR*)( mesure des températures de surface de la mer, observations des nuages, émissivité des continents et des surfaces glacières ).
- \* sondeur micro-ondes ( *MWS*)( mesure de la vapeur d'eau atmosphérique).

***PRARE ( Precise Range and Range-Rate Equipment )***

équipement de mesure précise de vitesse et de distance ; mesure de la position du satellite et détermination des caractéristiques orbitales à l'aide de rétro-rélecteurs laser ( *LRR* ) et de stations sols de télémétrie laser.

***IDHT ( Instrumentation Data Handling and Transmission )***

système de gestion et de transmission des données des instruments

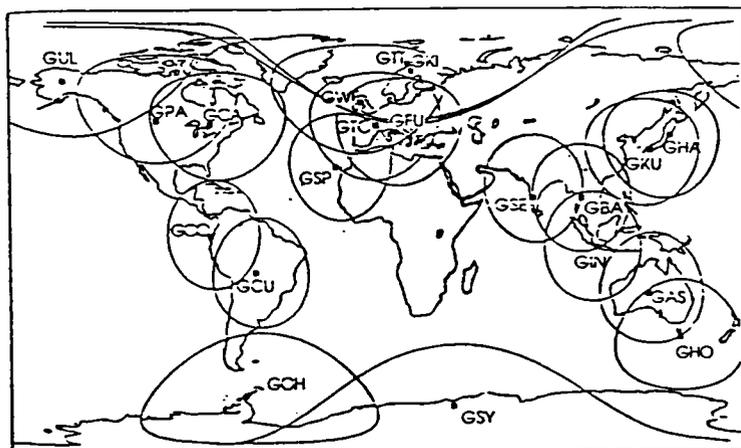
- \* stockage des données à bord ( deux enregistreurs 6.5 Gbits soit une capacité d'environ une orbite chacun )
  - \* acquisition, formatage et transmission des données
- débit élevé ( *SAR mode image* ) .....105 Mbit/s  
faible débit ( autres instruments).....1093 kbit/s  
lecture des enregistreurs de bord.....15 Mbit/s

**Caractéristiques de l'orbite du satellite ERS-1**

type	presque circulaire,héliosynchrone,polaire
altitude	782 à 785 kms
inclinaison	98.52°
heure solaire (à l'équateur)	10h30
période	100mn
orbites/jour	14.3
cycle de répétitivité	3 , 35 ou 176 jours

**Mission du satellite ERS1**

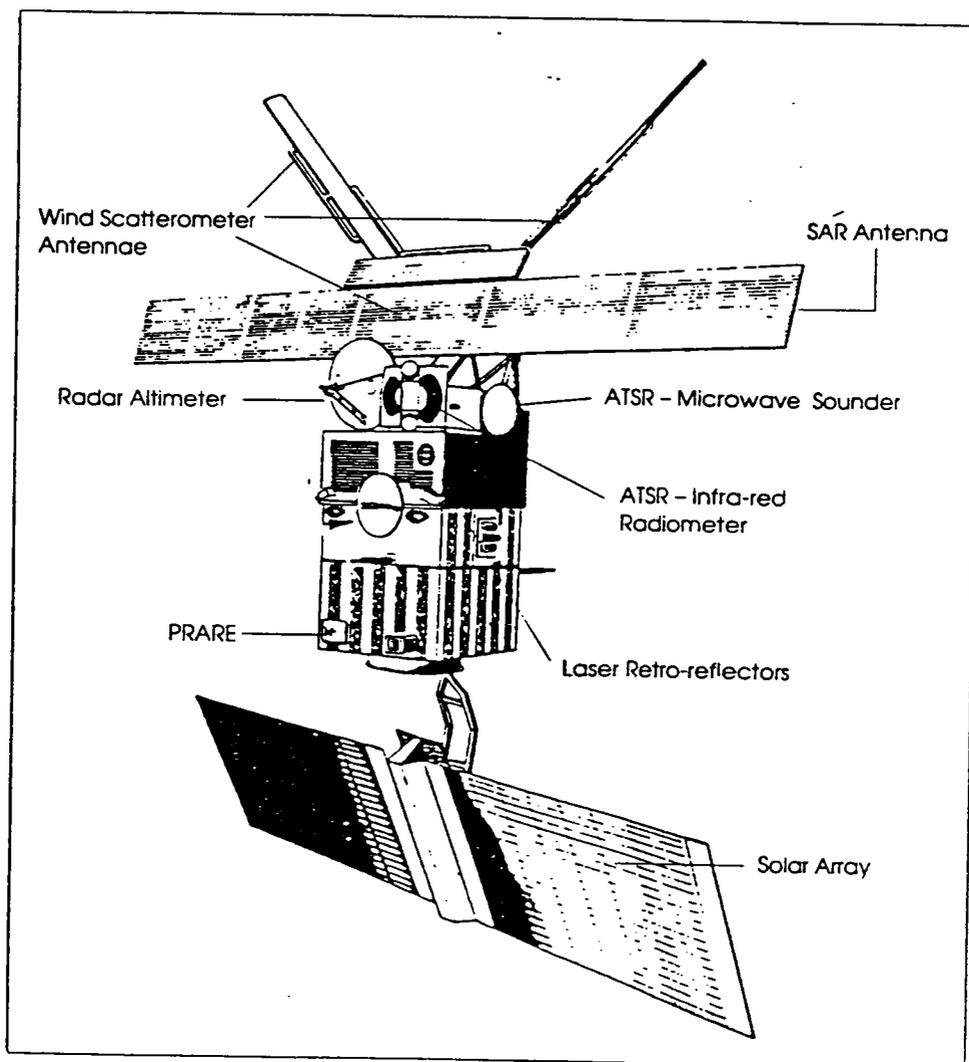
Phase	cycle de répétitivité (jours)	orbites/cycle	période
			17/07/91
Mise en orbite (Orbit Acquisition)	3	43	30/07/91
Mise en service (Commissioning Phase)	3	"	12/12/91
1ère phase d'étude des glaces (First ice phase)	3	"	28/12/91
Mode expérimental "roulis-basculement" (Roll-tilt mode - RTM)	3	"	04/04/92
Phase d'étude multi-disciplinaire (Multi disciplinary phase)	35	501	14/04/92
2ème phase d'étude des glaces (Second ice phase)	3	43	15/12/93
Phase d'étude géodésique (Geodetic phase)	176	2527	03/94

**Réseau des stations de réception ERS1 et leurs couvertures**

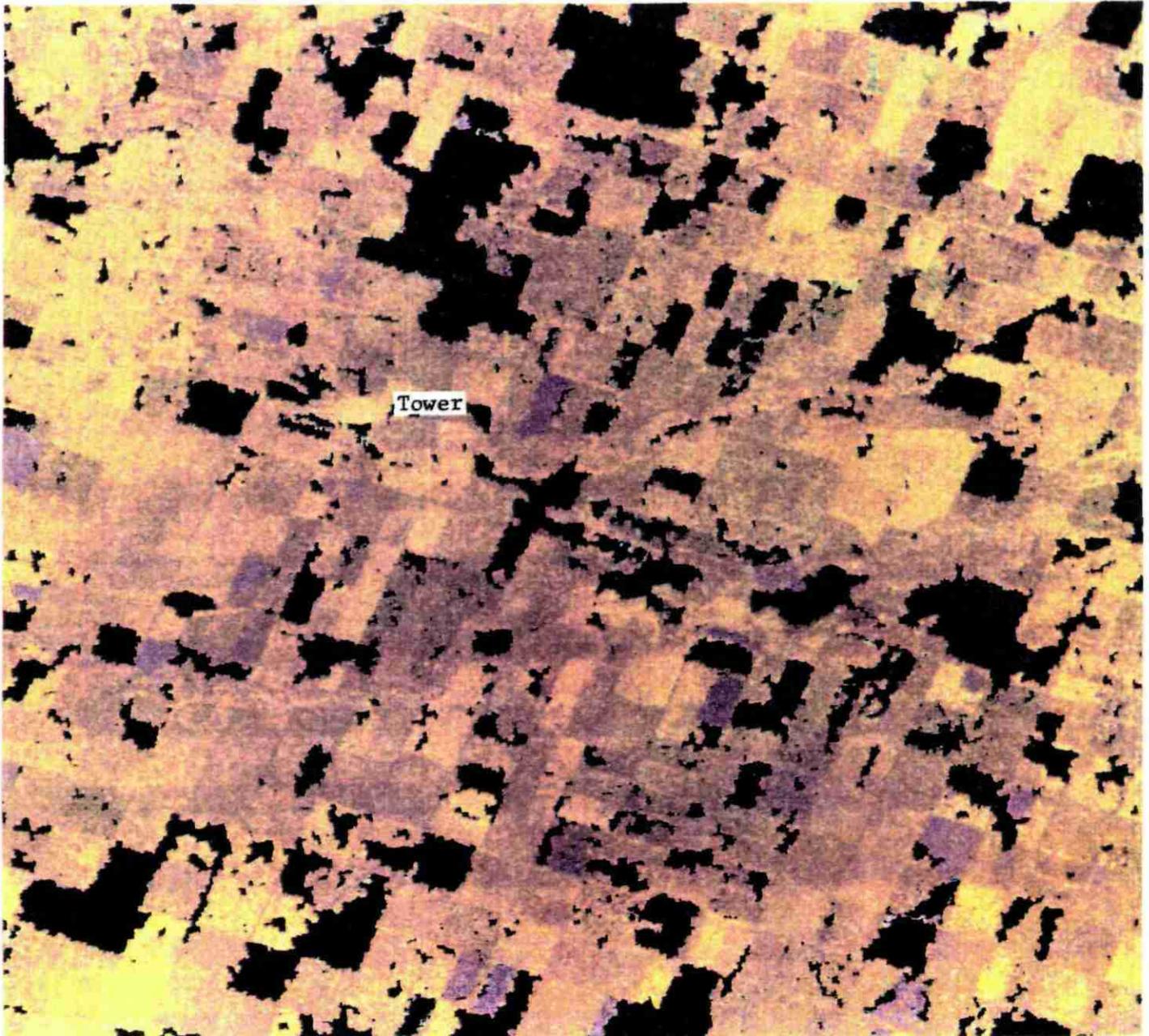
GAS	- Alice Springs, Australia
GBA	- Bangkok, Thailand
GCA	- Ganegau, Canada
GCC	- Cotoacsa, Ecuador
GCU	- Cuiba, Brazil
GFU	- Fucuo, Italy
GHA	- Hatoyama, Japan
GHO	- Hobart, Australia
GIN	- Jakarta, Indonesia
GKI	- Kiruna, Sweden
GKU	- Kumamoto, Japan
GCH	- O'Higgins, Antarctica
GPA	- Prince Albert, Canada
GSE	- Hyderabad, India
GSP	- Mascotas, Canada
GSY	- Syowa, Antarctica
GTO	- Aussagues, France
GTT	- Tromsø, Norway
GUL	- Fort Collins, Alaska
GW	- West Freugh, Scotland

Liste des produits autonomes d'ERS-1 délivrés à partir du SAR -mode image-(code ESA)

- Données brutes annotées (RAW)
- Images à livraisons rapides (UI16) -copie (FDC)
- Images complexes monovues (SLC)
- Images de précision (PRI)
- Images géocodées de l'ellipsoïde (GEC)
- Images géocodées corrigées (GTC01)

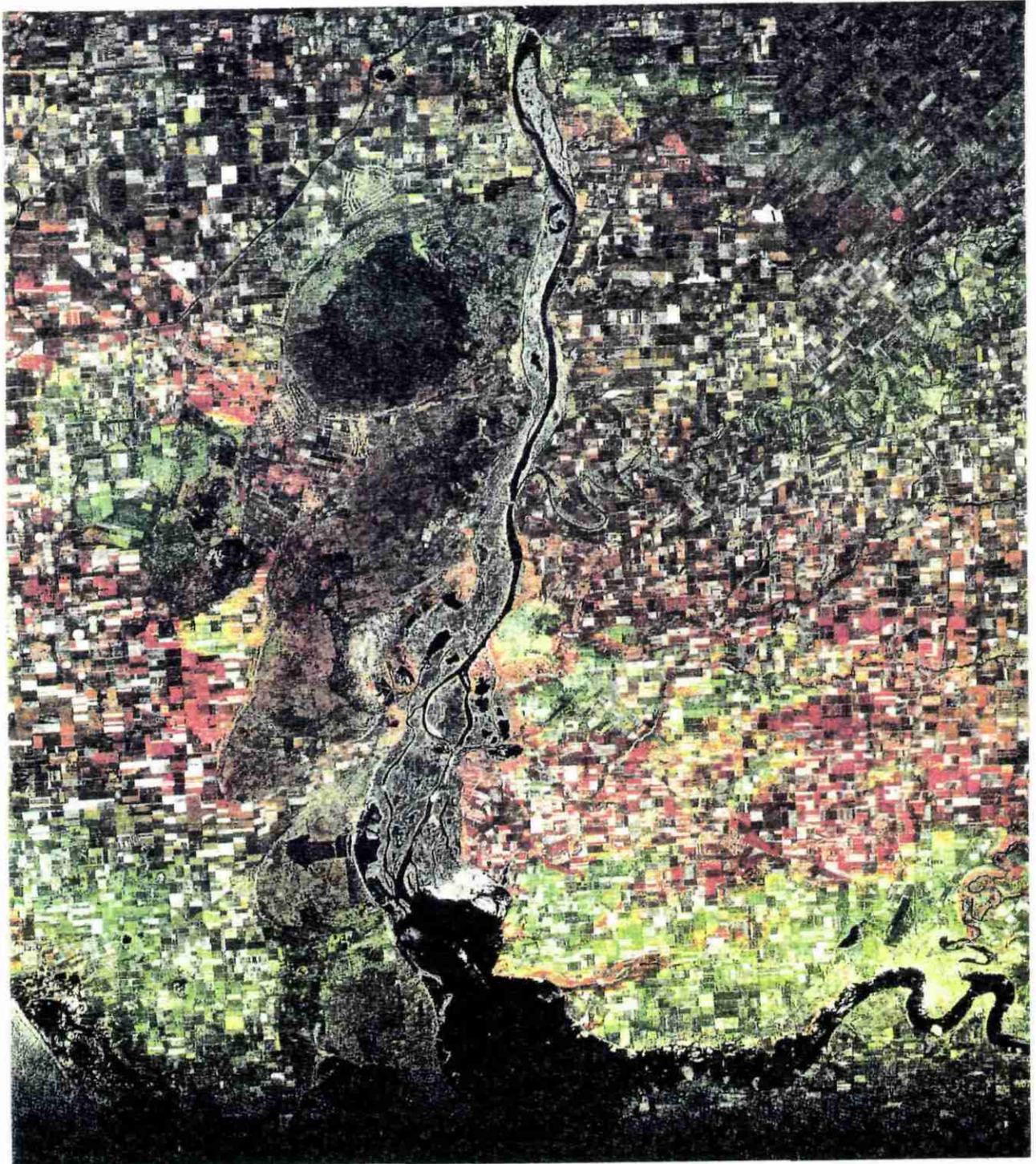


ANNEXE 2



A.K. Gabriel, R.M. Goldstein, and H.A. Zebker -1989- JPL -California- Institute of Technology - Pasadena.

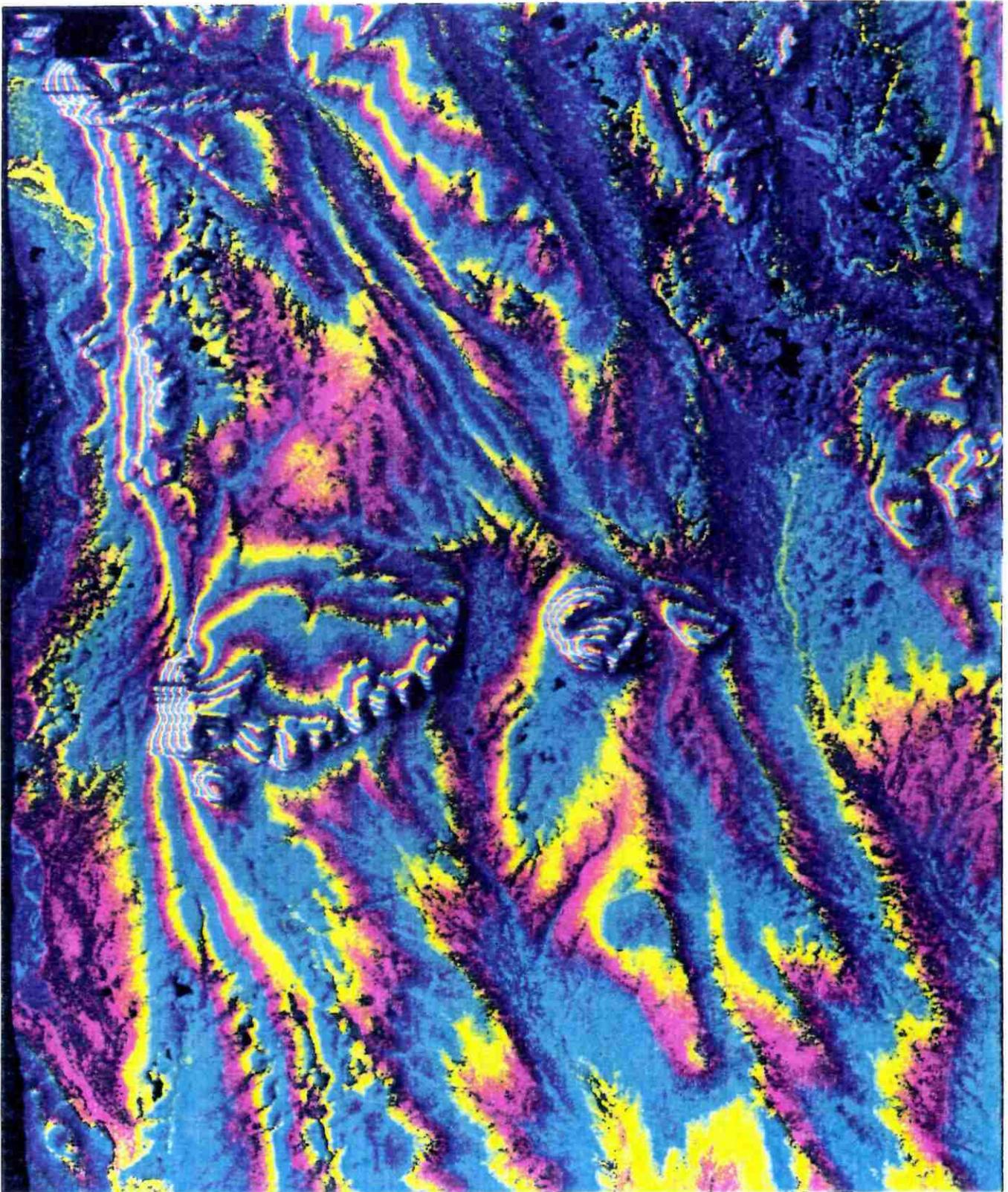
Illustration de l'article : Mapping small elevation changes over larges areas : Differential radar interferometry - Double interférogramme réalisé à partir de données SAR SEASATsur la région de la Vallée Impériale en Californie, USA. Le jaune ne représente aucun changement, le noir représente une perte de cohérence de phase entre les jeux de données, et le rouge et bleu représente des changements dans la topographie de l'ordre de 2-3 cm (gonflement du sol suite à l'irrigation) .



**D. MASSONNET, 1992, CNES, Toulouse, France.**

Illustration de l'article "Perspectives de l'interférométrie par radar"

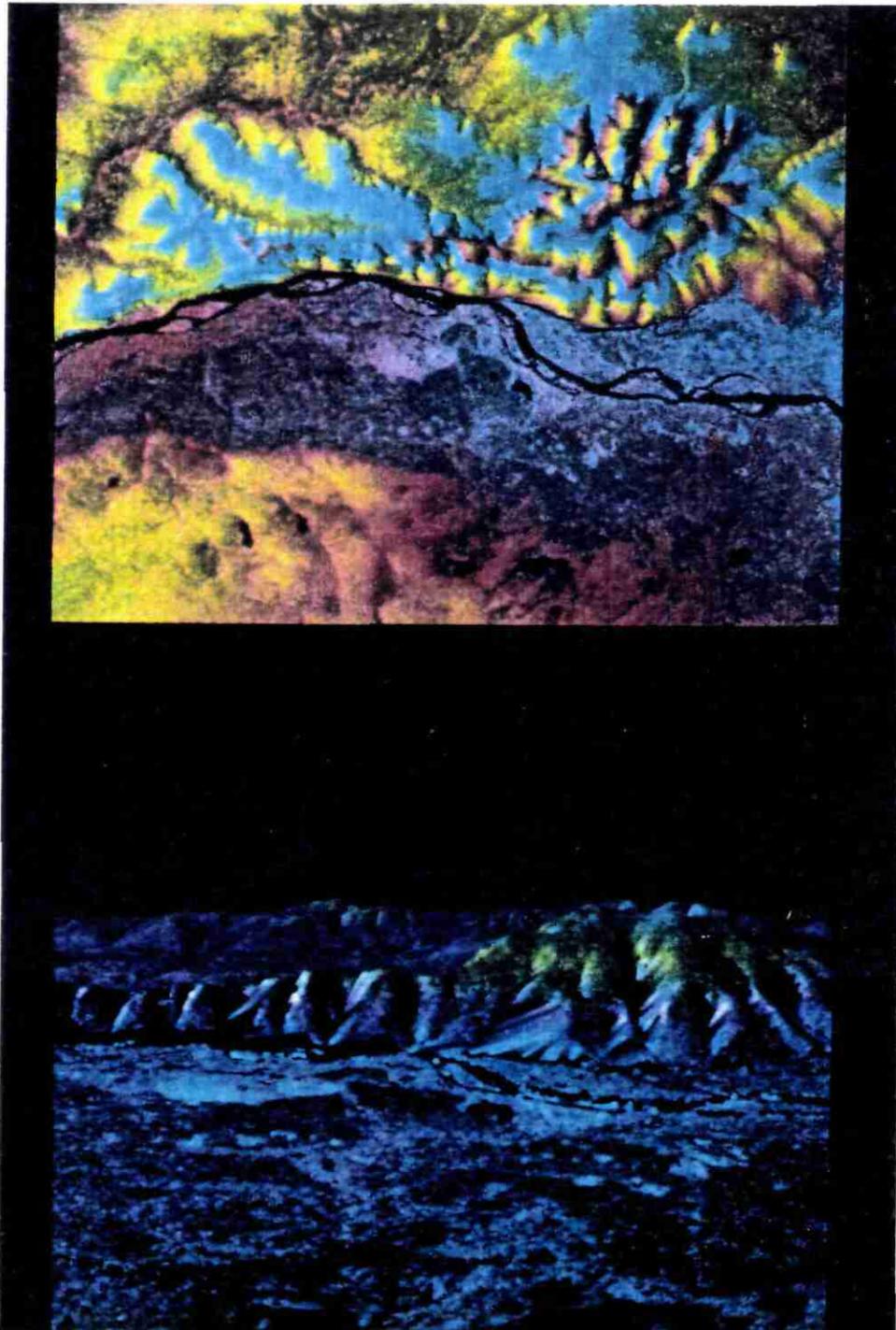
Codage en couleur du produit interférométrique (copyright ESA 1991)



**C.L. WERNER, Université de Zürich, R.Goldstein, P. Rosen & H. Zebker, JPL-Pasadena-California, 1992.**

Illustration de la présentation "Techniques and Applications of SAR Interferometry for ERS1 Topographic Mapping, Slope Measurement and Change Detection - 1st Workshop SAR Interferometry Working Group, ERS1 FRINGE, ESA/ESRIN, Frascati, Italy, 12/10/92.

Interférogramme sur la région de "TOOLIK LAKE", intervalle de couleur 6m, espacement de répétition des couleurs 96m.



**C. Werner et R. Goldstein - Université de Zürich et Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA.**

L'image du haut montre une carte des reliefs d'une région traversée par le fleuve Tanana en Alaska, obtenue par interférométrie SAR ERS1. Sur l'image du bas, les données topographiques du relief ont servi à créer une vue 3D de la façade montagneuse située au nord de la rivière que l'on voit au centre de l'image du haut.

## Bibliographie Thématique

### Interférométrie

Carande, R.E., Goldstein, R.M., and AI, 1991, Dual frequency along-track interferometry : A status report, Proceedings of the Third Airborne Aperture Radar (AIRSAR) Workshop, 23-24 May 1991 (J.P.L. Publication 91-30), pp.109-113.

Cumming, I., Gray, L., 1989, Interferometric radar, a better tool for exploration geology ? , presented at the Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada, october 2-6, 1989.

Cumming, I., Hawkins, D., and Gray, L., 1990, All-weather mapping with interferometric RADAR , 23rd International Symposium on Remote Sensing of Environnement , Bangkok , Thailand , April 18-25 , 1990.

Evans,D.L.,1992,Geologic process studies using Synthetic Aperture Radar (SAR) data, Episodes, March 1992, vol.15, no.1, pp.21-31.

Gabriel, A.K., and Goldstein, R., 1988, Crossed orbits interferometry:theory and experimental results from SIR-B, International Journal of Remote Sensing, 9, 857\_872.

Gabriel,A.K.,Goldstein,R.M.,and Zebker,H.A.,1989,Mapping small elevation changes over larges areas:Differential radar interferometry,Journal of Geophysical Research,v.94,no.B7,pp.9183-9191.

Goldstein,R.M.,Zebker,H.A.,and Werner,C.L.,1988,Satellite radar interferometry:Two dimensional phase unwrapping,Radio Science,v.23,no.4,pp.713-720.

Graham,L.C.,1974,Synthetic interferometer radar for topographic mapping,proceedings of the I.E.E.E.,vol.62,n°6,June 1974.

Gray,A.L.,1992,Airborne SAR interferometry at CCRS,Specialty meeting on airborne RADARS and LIDARS,Toulouse,Fance,7-10 july 1992,pp.215-218.

Gray, A.L., Mattar, K.E., and Farris-Manning, P.J., 1992, Airborne SAR interferometry for terrain elevation, DIGEST IGARSS'92, Inter. geosci. remote sensing symposium, I.E.E.E., 1992.

Gray,A.L.,Farris-Manning,P.J.,1993, Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

Hagberg, J.O., & Ulander, L.M.H., 1993, On the optimization of interferometric SAR for topographic mapping, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

Hartl, Ph., Reich, M., Thiel, K.-H., Xia, Y., 1992, SAR-interferometry applying ERS-1, some preliminary test results, Proceedings First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 4-6 November 1992.

Li, F., and Goldstein, R.M., 1987, Studies of multibaseline spaceborne interferometric

Synthetic Aperture Radar, Proceedings of IGARSS'87, held in Ann Arbor, Michigan, in 1987 (New-York:I.E.E.E.), pp.1545-1549.

Livingstone, C.E., Gray, A.L., Hawkins, R.K., and Olsen, R.B., 1988, CCRS C/X-airborne synthetic aperture radar : an R and D tool for the ERS-1 time frame, presented at the IEEE 1988 National Radar Conference, IEEE AES Magazine, October 1988.

Madsen, S.N., Zebker, H.A., & Martin, J., 1993, Topographic mapping using radar interferometry : processing techniques, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

Massonnet, D., 1985, Etude de principe d'une détection de mouvements tectoniques par RADAR, CT/PF/TI/AS n° 326 (internal memo)-16.11.85.

Massonnet, D., 1992, Perspectives de l'Interférométrie par Radar, Journée S.F.P.T. de Grenoble, le 18 décembre 1992, 'Télé-détection en montagne', Bul.S.F.P.T. n°127 (1992-3).

Massonnet, D., and Rabaute, T., 1993, Radar interferometry : limits and potential, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, n°2, March 1993.

Moccia, A., and Vetrella, S., 1992, A tethered interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) for topographic mission, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.30, no.1, January 1992.

Moccia, A., Esposito, S., D'Errico, M., 1993, Height measurement accuracy by ERS-1 SAR interferometry, International Workshop on SAR Interferometry, NAPLES, 18-20 May 1993.

Prati, C., Rocca, F., and Monti Guarnieri, A., 1989, Effects of speckle and additive noise on the altimetric resolution of interferometric SAR (ISAR) surveys, proceedings IGARSS'89, 9th Annual international geoscience and remote sensing, Vancouver 1989.

Prati, C., and Rocca, F., 1990, Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images, Int. J. Remote Sensing, 1990, vol.11, no.12, 2215-2235.

Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A., and Damonti, E., 1990, Seismic migration for SAR focusing : interferometrical applications, I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.28, no.4, July 1990.

Prati, C., Rocca, F., and Monti Guarnieri, A., 1992, SAR interferometry experiments with ERS-1, Proceedings First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 4-6 November 1992.

Rogers, A.E.E. and Ingalls, R.P., 1969, Venus : Mapping the surface reflectivity by RADAR interferometry, Science, vol.165, n° 3895, 22 August 1969.

Werner, C.L., Hensley, S., Goldstein, R.M., Rosen, P.A., & Zebker, H.A., 1992, Techniques and applications of SAR interferometry for ERS-1 : Topographic mapping, change detection, and slope measurement, Proceedings First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 4-6 November 1992, ESA SP-359.

Zebker, H.A., and Goldstein, R.M., 1985, Topographic mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar observations, Proceedings of IGARSS'85, held in Amherst, Massachusetts, on 7-9 October 1985 (New-York:I.E.E.E.), pp.113-117.

Zebker, H.A., 1991, The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument, Proceedings of the Third Airborne Synthetic Aperture Radar (AIRSAR) Workshop, 23-24

May 1991 (J.P.L. Publication 91-30), pp.230-233.

Zebker, H.A., and Villasenor, J., 1992, Decorrelation in interferometric RADAR echoes, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.30, n°5, September 1992.

Zebker, H.A., Madsen, S.N., Martin, J., Wheeler, K.B., Miller, T., Lou, Y., Alberti, G., Vetrella, S., and Cucci, A., 1992, The TOPSAR interferometric RADAR topographic mapping instrument, I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.30, n°5, September 1992.

\*\*\*\*\*

Proceedings of 1st Workshop, SAR Interferometry working group, ERS1 Fringe, ESA ESRIN, Frascati, Italy, 12th October, 1992.

### **RADAR / principe - généralités**

Aguttes, J.P., Massonnet, D., and Grosjean, O., 1990, A new french RADAR system for earth resources monitoring, 10th annual international geoscience and remote sensing symposium, Washington D.C., May 1990.

ESA, 1989, Principles of RADAR imagery (lecture notes), RSC series 46, Rome.

Elachi, C., 1982, Radar images of the Earth from space, Scientific-American, 247, (6), pp.46-53.

Evans, D.L., 1991, Current status and future developments in RADAR remote sensing, Proceedings of the 5th international colloquium-Physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991 (ESA SP-319, May 1991).

Huneycutt, B.L., 1990, Innovative operating modes and techniques for the spaceborne imaging RADAR-C instrument, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.28, no.4, July 1990.

Jensen, H., Graham, L.C., Porcello, L.J., and Leith, E.N., 1977, Side looking airborne RADAR, Scientific American, pp.84-95, October 1977.

Léone, F., 1992, L'observation de la Terre par RADAR - Généralités sur l'imagerie RADAR, Section géographique militaire, Joigny, France, Mai 1992.

Léone, F., 1992, Etude prospective sur l'aptitude de l'imagerie RADAR spatiale ERS-1 à la réalisation des cartes "mouvement tout terrain", Section géographique militaire, Joigny, France, Septembre 1992.

Livingstone, C.E., Gray, A.L., Hawkins, R.K., and Olsen, R.B., 1988, CCRS C/X-airborne synthetic aperture radar : an R and D tool for the ERS-1 time frame, presented at the IEEE 1988 National Radar Conference, IEEE AES Magazine, October 1988.

Massonnet, D., & Adragna, F., 1990, Synthetic aperture RADAR : New processing concepts, 10th annual international geoscience and remote sensing symposium, Washington D.C., May 1990.

Polidori, L., 1987, Exploitation d'images RADAR (Exemples d'application à partir de données VARAN), stage D.E.A. méthodes physiques en télédétection, Université Paris 7.

Van Zyl, J.J., 1993, The effect of topography on radar scattering from vegetated areas,

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

### Ouvrages

Elachi, C., Spaceborne radar remote sensing : Applications and techniques, IEEE Press, copyright 1988.

Leberl, F.W., 1945-Radargrammetric image processing, Artech House, Inc, Norwood, MA 02062,copyright 1990.

Rees, W.G., Physical principles of remote sensing, Cambridge University Press, 1990.

Remote sensing reviews, 1983, vol.1(Harwood Academic Publishers GmbH,1983), Editor F. Becker.

Trevett, J.W., 1986, Imaging RADAR for resources surveys, Chapman and Hall, London New-York.

Ulaby, F.T., Moore,R.K., & Fung, A.K., Microwave Remote Sensing Active and Passive, vol.I, II, III, Artech house.Inc.

### **RADAR / Imagerie - cartographie**

Boerner, W.M., 1981, Optimal polarization concept in RADAR imaging, Proceedings of ESA-EARSeL Workshop, Alpbach, Austria, 16-20 March 1981 (ESA SP-166,May 1981).

Elachi, C., 1982, Radar images of the Earth from space, Scientific-American, 247, (6), pp.46-53.

Elachi, C., Im, K.E., Li, F., and Rodriguez, E., 1990, Global digital topography mapping with a synthetic aperture scanning RADAR altimeter, Int. J. Remote Sensing, 1990, vol.11, no.4, pp.585-601.

Koopmans, B.N., 1982, Some comparative aspects of SLAR and airphoto images for geomorphologic and geologic interpretation, I.T.C. Journal 1982-3.

Massonnet, D., 1990, FOCUS : An experiment for high resolution RADAR imagery,digital terrain model derivation and earth small moves detection, 10th annual international geoscience and remote sensing symposium, Washington D.C., May 1990.

Rebillard, P., and Evans, D., 1983, Analysis of coregistered LANDSAT,SEASAT and SIR-A images of varied terrain types, Geophysical Research Letters, vol.10, no.4, April 1983.

Schlude, F., 1981, Imaging RADAR systems, Proceedings of ESA-EARSeL Workshop, Alpbach, Austria, 16-20 March 1981 (ESA SP-166,May 1981).

### **RADAR / Texture , Traitement d'images**

Figue,J.,et Methais,J.M.,Méthodes de caractérisation de texture appliquées aux images RADAR,Stage de D.E.A. IARFA,UPMC-Paris VI.

Hirose,T.K.,McNutt,L.,Paterson,J.S., A study of textural and tonal information for classifying sea ice from SAR imagery,pp.747-750.

Laur, H., 1989, Analyse d'images radar en télédétection : discriminateurs radiométriques et texturaux - Thèse de doctorat spécialité traitement d'image - Centre national d'étude spatiale et des rayonnements / Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Renaud, X., 1989, Développement et utilisation de traitements d'images à partir des données numériques SPOT et TM en vue d'optimiser l'interprétation géologique en zone intertropicale, D.E.A. Méthodes physiques en télédétection, Paris 7, B.R.G.M. Orléans.

Sawyer, F.G., & Lancashire, D.C., 1992, Feature detection using ERS-1 SAR data, Proceedings of Satellite Symposia 1&2 : Navigation & Mobile Communications, and Image Processing, GIS & Space-assisted Mapping, from the 'International Space Year' Conference, held in Munich, Germany, 30 March - 4 April 1992 (ESA ISY-2, July 1992).

### **RADAR / Stéréoscopie**

Arai, K., Fujimoto, N., Tsuchiya, K., and Tateishi, R., 1989, Terrain height estimation based on stereoscopic pair images of SPOT / HRV, Adv. Space Res., vol.9, no.1, pp.(1)109-(1)114,1989.

Buchroithner, M.F., 1989, Stereo-viewing from space, Adv. Space Res., vol.9, no.1, pp.(1)29-(1)40, 1989.

Fuller, J.K., Leberl, F., Marque, R.E., 1986, Opposite-side SAR image processing for stereo viewing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, September 1986, vol.52, no.9, pp.1487-1498.

Goodyear Aerospace corporation, Arizona Division, 11 June 1979, Stereo RADAR for mapping and interpretation, presented to Radar geology workshop, Snowmass, Colorado, July 1979.

Koopmans, B.N., Should stereo SLAR imagery be preferred to single strip imagery for thematic mapping?

### **RADAR / Speckle**

Posner, F.L., 1993, Texture and speckle in high resolution synthetic aperture radar clutter, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

Lopes, A., Ridha, T., and Nezry, E., 1990, Adaptive speckle filters and scene heterogeneity, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.28, n°6, November 1990.

### **RADAR / Applications**

#### **1 - Humidité**

Brackman, P., Goossens, R., 1990, Mapping of soil material in SW Messinia (Greece) using SPOT-HRV data, IGARSS'90, Washington, D.C., May 20-24, vol.1, pp.685-688.

Fily, M., and Dedieu, J.P., 1992, Airborne RADAR imagery of a snow covered terrain in the Alps, Specialty meeting on airborne RADARS and LIDARS, Toulouse, France, July 1992.

Goossens, R., Brackman, P., De

Vliegheer, B.M., Hardy, J.R., Millington, A.C., Styles, P.J., 1990, Integrated soil and water balance mapping in Messinia, Greece, using SPOT, TM, climatic and DEM data, Proceedings of the 10th EARSeL symposium, Toulouse, France, 5-8 June 1990.

## 2 - polarisation

Evans, D.L., Farr, T.G., Ford, J.P., Thompson, T.W., Werner, C.L., 1986, Multipolarisation RADAR images for geologic mapping and vegetation discrimination, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol. GE-24, no.2, March 1986.

## 3 - rugosité

Evans, D.L., Farr, T.G., Van Zyl, J.J., 1992, Estimates of surface roughness derived from synthetic aperture RADAR (SAR) data, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.30, n°2, March 1992.

## 4 - glaces

Gray, A.L., and Arsenault, L.D., 1991, Time-delayed reflections in L-band synthetic aperture imagery of icebergs, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.29, n°2, March 1991.

Scambos, T.A., Dutkiewicz, M.L., Wilson, J.C., Bindschadler, R.A., 1992, Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data, Remote sensing of environment, vol.42, n°3, Décembre 1992.

## RADAR / Géologie

Jet Propulsion Laboratory, 1986, Shuttle imaging RADAR-C science plan, J.P.L. publication 86-29.

Macdonald, H.C., Techniques and applications of imaging radars, Remote sensing in geology, John Wiley & Sons, New-York Chichester Brisbane Toronto (Editor Siegal, B.S., & Gillespie, A.R.), chapter 10.

Laboratoire régional de l'est parisien, Equipement Ile-de-France, 1991, Etude d'application d'un RADAR spatial dans le domaine géologie, dossier 1 0 08694, Mai 1991.

Rudant, J.P., Chorowicz, J., et Durand, P., 1988, Problèmes d'interprétation géomorphologique et géologique et modélisation géométrique d'images RADAR à partir d'un modèle numérique de terrain, C. R. Acad. Sci. Paris, t.306, série II, p.15-20, 1988.

Scanvic, J.Y., Rouzeau, O., et Leroi, E., 1992, La télédétection spatiale stéréoscopique - Un outil de géomorphologie qualitative et quantitative : exemple d'utilisation en région andine pour la cartographie des zones de susceptibilité aux mouvements de terrain, Bul. S.F.P.T. n°125, 1992.

Singhroy, V.H., 1992, RADAR geology : Techniques and results, Episodes, vol.15, no.1, March 1992.

Polidori, L., 1991, Validation de modèles numériques de terrain - Application à la cartographie des risques géologiques, Thèse de doctorat, spécialité Méthodes physiques en télédétection, Paris 7.

Polidori, L., 1991, Digital terrain models from RADAR images : A review, Proc. Intl. Symp. on Radars and lidars in Earth and Planetary Sciences, Cannes, France, 2-4

September 1991 (ESA SP-328).

Polidori, L., 1992, Aptitudes et limitations du RADAR à ouverture synthétique pour la cartographie, bul.S.F.P.T. no.125.

#### **RADAR/ Comparaison autres capteurs**

Mekarnia,A.,Rudant,J.P.,Chorowicz,J.,Charron,C.,1991,Synergie des imageries à haute résolution spatiale hyperfréquences et optiques en géomorphologie.

#### **RADAR/ Systèmes , présentation technique**

Aguttes,J.P.,Massonnet,D.,Grosjean,O.,1990,A new french RADAR system for earth resources monitoring, 10th Annual international geoscience and remote sensing symposium, Washington, D.C., May 1990.

##### *RADARSAT*

Denyer, N., Princz, J., Feehan, T., and Ketchum, P., 1990, ERS-1 points the way for RADARSAT, GEOS, 1990/2.

Cox, R.P., and Ferguson, I.D., 1991, RADARSAT - the versatile SAR, Proceedings of the eight thematic conference on geologic remote sensing, vol.1, April 29-May 2 1991, Denver, USA.

##### *RESSAC*

Hauser, D., Caudal, G., Rijckenberg, G.J., Vidal-Madjar, D., Laurent, G., Lancelin, P., 1992, RESSAC : A new airborne FM/CW RADAR ocean wave spectrometer, I.E.E.E. Transactions on geoscience and remote sensing, vol.30, n°5, September 1992.

##### *"Les Vans"*

Scanvic,J.Y.,Cluseau,B.,Kerr,Y.,Gess,G.,"Les Vans",Experience SAR 580,GDTA/CEE.

#### **Instrumentation / Positionnement**

CNES/GRGS/IGN,Orbitographie et localisation précises par satellite DORIS.

SPOT Image,DORIS sur SPOT 2 (Newsletter,n°4,Janvier 93).

Wu, Sien-Chong, & Melbourne, W.G., 1993, An optimal GPS data processing technique for precise positioning, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

#### **Etudes RADAR / sites Tests**

Deroin, J.P., Rudant, J.P., et Wadsworth, A., 1991, Apport du RADAR imageur SAR au suivi de structures géologiques à terre et en mer. Exemple de l'île de Wight (Manche centrale), C. R. Acad. Sci. Paris, t.312, série II, p.1099-1106, 1991.

Granath, J.W., Soofi, K.A., Mercer, J.B., 1991, Applications of SAR in structural modeling of the central ranges thrust belt, Irian Jaya, Indonesia, Proceedings of the eighth thematic conference on geologic remote sensing, Denver, Colorado, USA, April 29-May 2, 1991.

Huadong, G., Chao, W., Yunhe, Z., 1991, Airborne SAR and SIR data for geologic applications in the Honggu region, China, Proceedings of the eighth thematic conference on geologic remote sensing, Denver, Colorado, USA, April 29-May 2, 1991.

Obert, D., Rudant, J.P., Chalumeau, J.F., Wadsworth, A., 1992, Application pour la recherche de sites d'exploitation de Gravières (région de Lons le saunier), Groupe ad hoc sur le RADAR spatial - expérimentation RADAR 2000.

Posehn, G.A., Genereux, J.A., 1991, The application of synthetic aperture RADAR to hydrocarbon exploration in the glaciated and boreal forested terrain of northeast British Columbia, Canada, Proceedings of the eighth thematic conference on geologic remote sensing, Denver, Colorado, USA, April 29-May 2, 1991.

Raymond, D., et Rudant, J.P., 1991, Application de l'imagerie RADAR à la prospection pétrolière - site de Gabian, Groupe ad hoc sur le RADAR spatial - expérimentation RADAR 2000.

Rudant, J.P., 1991, Stereoscopie RADAR - site de la Sainte Victoire, Groupe ad hoc sur le RADAR spatial - expérimentation RADAR 2000.

Rudant, J.P., Deroin, J.P., et Wadsworth, A., 1991, Apport des hyperfréquences actives à l'analyse structurale des plates-formes épicontinentales : Exemple de la Manche, Proceedings of the 5th international colloquium - Physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991 (ESA SP-319, May 1991).

Saunders, R.S., 1990, The surface of Venus, Scientific American, December 1990, pp.26-31.

### Mouvements de terrain

Vilasenor, J.D., Fatland, D.R., & Hinzman, L.D., 1993, Change detection on Alaska's north slope using repeat-pass ERS-1 SAR images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

Wang, F., 1993, A knowledge-based vision system for detecting land changes at urban fringes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.31, n°1, January 1993.

### Ouvrages

Barrett, E.C., Brown, K.A. and Micallef, A., Remote Sensing for Hazard Monitoring and Disaster assessment: marine and coastal applications in the Mediterranean region, in series Current Topics in Remote Sensing, vol.2, Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphie, 1991.

Flageollet, J.C., Les mouvements de terrain et leur prévention, Collection géographie, Masson, Paris, 1988.