



HAL
open science

De la synergie des images satellitaires SPOT/ERS au travers de deux exemples de fusion

Luce Castagnas

► **To cite this version:**

Luce Castagnas. De la synergie des images satellitaires SPOT/ERS au travers de deux exemples de fusion. Traitement des images [eess.IV]. Université de Nice Sophia-Antipolis, 1995. Français. NNT : . pastel-00979324

HAL Id: pastel-00979324

<https://pastel.hal.science/pastel-00979324v1>

Submitted on 15 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS
ECOLE DOCTORALE - SCIENCES POUR L'INGENIEUR

pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN SCIENCES

spécialité

SCIENCES DE L'INGENIEUR

par

Luce CASTAGNAS

sujet :

DE LA SYNERGIE DES IMAGES SATELLITAIRES
SPOT/ERS AU TRAVERS DE DEUX EXEMPLES
DE FUSION

Soutenue le mardi 5 décembre 1995 devant le jury composé de :

Mr.	Claude KLAPISZ	Président
Mme.	Odile TACONET	Rapporteurs
MM.	Laurent POLIDORI	
	Albert PAPIERNIK	Examineurs
	Christian ROUCHOUZE	
	Lucien WALD	

REMERCIEMENTS

Je remercie monsieur Claude Klapisz, professeur à l'Université de Paris VII de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Et par son intermédiaire, je tiens à remercier les différents protagonistes, professeurs et étudiants, avec qui j'ai partagé les enseignements du DEA de Méthodes Physiques en Télédétection.

Je remercie sincèrement monsieur Albert Papiernik pour sa bienveillance et pour avoir accepté mon inscription dans sa formation doctorale.

J'exprime également ma reconnaissance à madame Odile Taconet, à messieurs Louis-François Pau et Laurent Polidori qui ont accepté d'exercer le rôle de rapporteurs.

Je regrette vivement que monsieur Louis-François Pau n'ait pu assister à la présentation orale de ces travaux.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Laurent Polidori pour l'intérêt particulier qu'il a porté à ce travail en acceptant d'être le rapporteur industriel, et dont les remarques ont été constructives pour la rédaction finale de ce manuscrit.

Mes remerciements vont aussi à monsieur Christian Rouchouze pour avoir suivi mon travail de thèse avec attention et pour m'avoir fait l'honneur de prendre part au jury.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Lucien Wald pour m'avoir proposé un sujet passionnant et pour m'avoir guidé et encouragé dans mes recherches. Tout comme je n'oublierai pas de remercier tous ceux qui ont participé à la vie du groupe Télédétection & Modélisation, et qui, pendant ces trois dernières années, ont été les auteurs d'une atmosphère de travail sympathique.

Cette thèse est aussi le fruit d'une collaboration. Je garderai un très bon souvenir des moments passés à l'Université de Wageningen au Pays-Bas. Je remercie monsieur Martien Molenaar ainsi que tous les membres de son groupe de recherche pour leur accueil chaleureux, avec une pensée particulière pour monsieur Hans van Leeuwen, avec qui j'ai mené un travail commun enrichissant.

Je ne voudrais pas non plus oublier tous ceux qui de près ou de (plus) loin m'ont soutenu tout au long de cette réalisation. A tous ceux qui accompagnent les pensées de *LBN*, trop nombreux pour être cités ici, mais à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères.

SOMMAIRE

Chapitre 1 :

INTRODUCTION	5
--------------------	---

Chapitre 2 :

A PROPOS DES CAPTEURS IMAGEURS EMBARQUES SUR LES SATELLITES

SPOT & ERS-1.....	13
2.1 INTRODUCTION.....	13
2.2 SPOT	
le premier satellite de télédétection spatiale français	14
2.3 ERS-1	
le premier satellite de télédétection spatiale européen	17
2.3.1 Introduction.....	17
2.3.2 Formation d'une image SAR	
formalisme.....	18
2.3.3 Principe de l'acquisition d'une image SAR	
instrumentation.....	19
2.3.4 Fonction de localisation f.....	23
2.3.5 Modélisation de l'observation de la surface terrestre, la fonction g	27
2.3.6 Modélisation de l'observable.....	33
2.3.7 Re-échantillonnage à partir d'une grille irrégulière	36
2.3.8 Le speckle	38
2.3.9 La fonction f'	39
2.3.10 Conclusion.....	40
2.4 CONCLUSION.....	40

Chapitre 3 :

FUSION DE DONNEES MULTICAPTEUR.....	41
3.1 INTRODUCTION.....	41
3.2 FORMALISME.....	42
3.3 PROBLEMATIQUE.....	45
3.4 ESPACE ET BASE DE REPRESENTATION DU RESULTAT DE LA FUSION.....	45
3.5 FUSION D'INFORMATION OPTIQUE/RADAR - COMPLEMENTARITE/REDONDANCE.....	48
3.6 PROCESSUS DE FUSION - INFERENCE/INCORPORATION.....	50
3.7 PROTOCOLE DE MELANGE - ARCHITECTURE DE FUSION.....	52
3.8 NIVEAU SEMANTIQUE.....	53
3.9 CONCLUSION.....	54

Chapitre 4 :

EXEMPLE DE FUSION D'ATTRIBUTS.....	55
4.1 LES MOTIVATIONS.....	58
4.2 LA PROCEDURE.....	58
4.3 ASSIMILATION DE MESURES CONTEMPORAINES.....	63
4.4 ASSIMILATION DE MESURES NON CONTEMPORAINES.....	67
4.5 CONCLUSION.....	68

FUSION DE PIXEL APPLIQUEE AUX IMAGES SATELLITAIRES SPOT/ERS.....	69
---	-----------

Chapitre 5 :

CHOIX DU REFERENTIEL TERRESTRE ORTHOGONAL.....	71
5.1 REFERENTIEL GEOMETRIQUE COMMUN - ORTHO-IMAGE.....	71
5.2 CHANGEMENT DE REFERENTIEL - CAS PARTICULIER DU SAR.....	73
5.3 CONSTRUCTION D'UNE IMAGE SYNTHETIQUE SAR.....	75
5.3.1 Modèle géométrique.....	77

5.3.2	Modèle radiométrique.....	78
5.3.3	Ré-échantillonnage - Maillage irrégulier.....	80
5.4	VRAISEMBLANCE DE L'IMAGE SYNTHETIQUE DETECTION DE POINTS HOMOLOGUES.....	84
5.5	QUALITE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE PRISE DE VUE	85
5.6	QUALITE DU MNT	85
5.7	CONCLUSION	89

Chapitre 6 :

CONSTRUCTION D'UNE ORTHO- IMAGE RADAR.....		90
6.1	SCHEMA GENERAL DE LA METHODE.....	92
6.2	LES DONNEES INITIALES.....	93
6.3	PRE-TRAITEMENTS	95
6.3.1	Couverture spatiale de la région étudiée par le MNT	96
6.3.2	Filtrage du speckle	97
6.3.3	Ré-échantillonnage sur maillage irrégulier	98
6.4	MISE EN CORRESPONDANCE.....	99
6.5	MODELE INVERSE.....	101
6.5.1	Loi de distribution radiométrique.....	102
6.6	CONCLUSION	107

Chapitre 7:

ORTHO- IMAGE SPOT/ERS : UN EXEMPLE DE FUSION AU NIVEAU DU PIXEL.....		108
7.1	LES MOTIVATIONS	109
7.1.1	Les paramètres physiques observés : l'humidité	110
7.1.2	Les paramètres physiques observés : la stratigraphie.....	110
7.1.3	Les paramètres physiques observés : la rugosité.....	110
7.2	PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE.....	111
7.2.1	Situation géographique de la région de Briançon.....	111
7.2.2	Description topographique	111
7.2.3	Description thématique	113

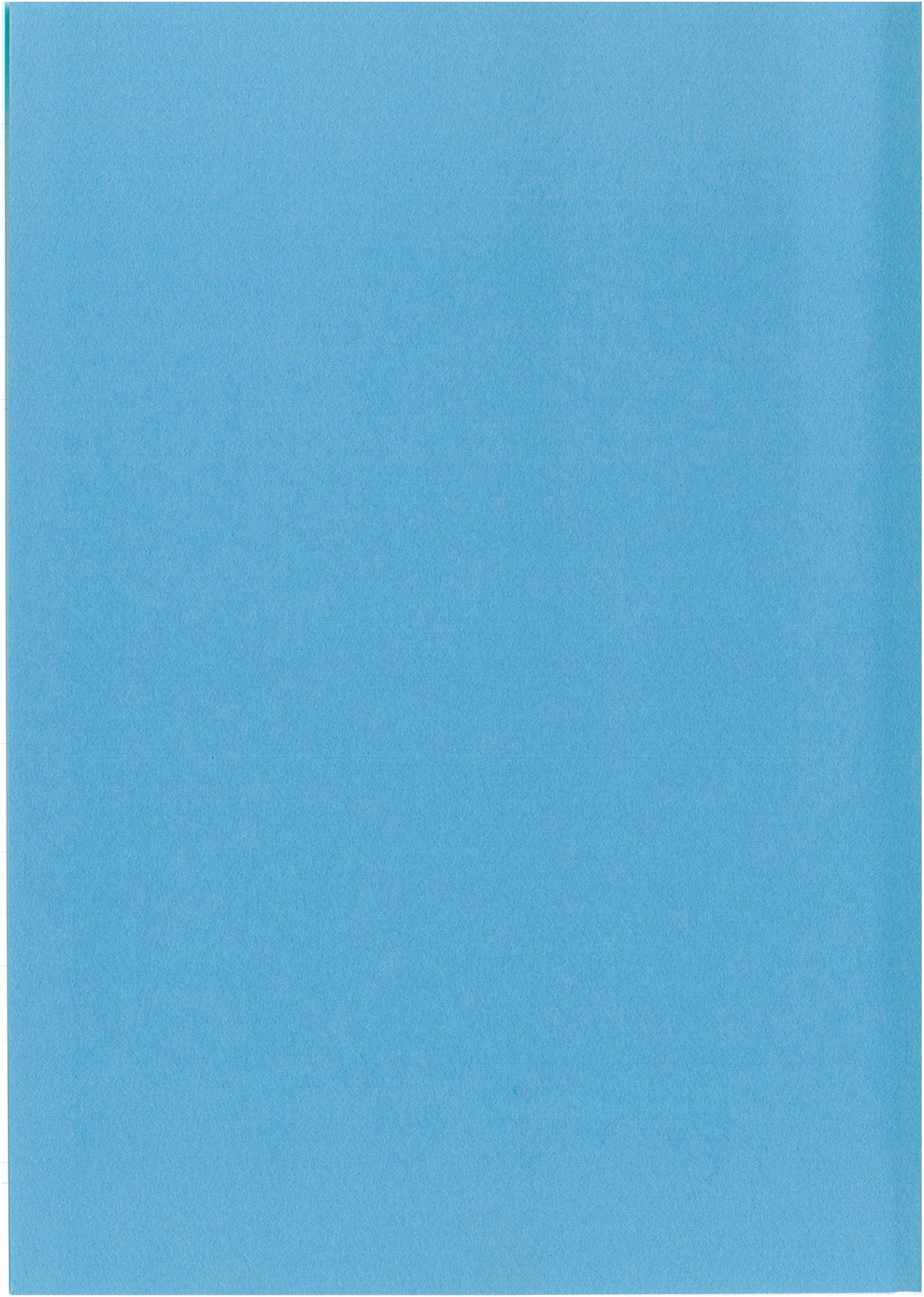


7.3	PRESENTATION DES DONNEES INITIALES.....	115
7.4	ORTHO-IMAGE SAR : TRAITEMENTS MIS EN OEUVRE.....	118
7.4.1	Filtrage du speckle	118
7.4.2	Traitement du MNT	119
7.4.3	Mise en correspondance.....	120
7.5	IMAGE DES AMPLITUDES.....	121
7.6	QUALITES DES ORTHO-IMAGES.....	123
7.7	STRATEGIE : FUSION DES ORTHO-IMAGES SAR ASCENDANTE ET DESCENDANTE.....	124
7.8	APPLICATION : ETUDE DU MANTEAU NEIGEUX.....	127
7.9	CONCLUSION	129

Chapitre 8 :

CONCLUSION	130
------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	133
----------------------------------	-----



Chapitre 1

INTRODUCTION

Depuis le lancement du premier satellite de télédétection dans les années soixante (Richelson, 1990), de nombreuses missions spatiales intégrant des **capteurs imageurs** se sont succédées, et ont permis d'obtenir des **images** numériques couvrant la totalité de notre globe terrestre. La capacité de ces nouveaux instruments à fournir en un temps quasi réel des informations sur de larges portions de Terre avec une fréquence de passage souvent élevée a suscité un grand intérêt chez de nombreux acteurs. La richesse des informations extraites des images satellitaires a, dans bien des cas, réduit le coût des études nécessitant des campagnes de mesures actualisées sur de larges zones de terrain, et a de plus allégé les contraintes dues au survol des territoires étrangers. Leur utilisation, aussi bien dans les domaines civil que militaire, a contribué au développement rapide de la télédétection spatiale en imposant des spécifications au niveau de la construction des futurs instruments et d'autres impératifs au niveau des missions. Aujourd'hui la **télédétection spatiale** se révèle être indispensable à de nombreuses réalisations et peut être considérée comme un domaine d'étude à part entière.

Un satellite de télédétection spatiale possède parfois à son bord divers instruments. Aussi, suivant les objectifs fixés, il faut sélectionner l'appareil qui fournira les mesures adéquates à l'aboutissement du projet fixé. La précision des résultats que l'on veut atteindre, permet, suivant les performances de chacun des instruments, de sélectionner les plus adaptés. Parmi les nombreux programmes spatiaux voués à l'observation de la Terre, nous nous intéresserons ici aux satellites ayant à leur bord des **capteurs imageurs**. La connaissance de ces instruments qui produisent des images numériques, et des plates-formes auxquelles ils sont assujettis, est nécessaire dès lors que l'on s'intéresse à la modification des caractères intrinsèques de leurs mesures. Aussi dans le cadre de cette étude une attention toute particulière a été accordée aux satellites de télédétection spatiale SPOT et ERS-1.

Depuis le début du **programme SPOT** (Satellite Pour Observer la Terre) en 1986, la télédétection spatiale n'a cessé de se développer en Europe et couvre aujourd'hui de nombreux domaines d'applications (Girard et Girard, 1989). Le satellite SPOT 3, lancé avec succès en 1994 assure la continuité du programme SPOT, avec à son bord deux capteurs imageurs passifs (*HRV, Haute Résolution dans le Visible*). Ceux-ci disposent de deux modes de fonctionnement : panchromatique et multispectral, choisis dans les domaines du visible et du proche infra-rouge. La fiabilité de l'instrument, ajoutée à la qualité des images obtenues, assure la pérennité d'une telle réalisation, dont le CNES et ses partenaires ne cessent d'accroître les performances.

Les coûts élevés de tels programmes spatiaux ont conduit les pays initiateurs à s'organiser pour réaliser des expériences scientifiques communes. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) dont une des missions est de coordonner les programmes spatiaux européens, se trouve à l'origine du **programme européen ERS-1**, le premier satellite européen de télédétection (Document ESA, 1991). Cette plate-forme constituée de nombreux instruments, possède en outre un capteur imageur actif (*AMI, Active Microwave Imageur*) opérant dans le domaine des hyperfréquences. C'est un radar à ouverture synthétique (*ROS, en anglais SAR*). Une des particularités de ce type de capteurs est de pouvoir observer le sol de jour comme de nuit et d'être totalement indépendant de la couverture nuageuse. La continuité du programme ERS-1 est assurée par la mission ERS-2, ces deux missions étant les précurseurs des programmes ENVISAT et METOP.

Lorsqu'on dresse les caractéristiques propres à chacun des capteurs imageurs optique et radar, on se rend compte qu'ils sont **complémentaires** sur certains points et **redondants** sur d'autres. Le premier aspect a constitué d'ailleurs une des motivations essentielles grâce à laquelle l'ESA s'est trouvée à l'initiative du projet ERS (Document ESA, 1992). Aussi la plate-forme ERS-1 a été munie d'instruments actifs pour réaliser des observations par radar de la surface terrestre.

Aujourd'hui les parties du **spectre électromagnétique** utilisées pour les capteurs imageurs passifs ou actifs, s'étendent **de l'optique aux hyperfréquences**. Devant toutes ces données mise à notre disposition, le problème du traitement de l'information, sur un plan monospectral ou sur un plan multispectral, s'est très vite posé. Une expérience certaine a été acquise en ce qui concerne le **traitement des images optique**. D'une part parce que ce sont des images qui nous sont plus familières par le fait que nos yeux pourraient être modélisés par le même type de capteur, et d'autre part, elles

ont été mises à notre disposition depuis plusieurs décennies. Il est vrai que le **traitement des images radar** a pu bénéficier de cette expérience, mais le caractère propre de ces images fait qu'une nouvelle approche doit être développée. En effet l'aspect des images radar est loin d'être conventionnel et les utilisateurs de celles-ci doivent développer de nouvelles expertises (Leberl, 1990).

Il est très vite apparu intéressant de faire collaborer des mesures issues d'instruments de types différents afin d'extraire des connaissances plus approfondies (principe de l'information croisée). De nouvelles applications ont vu le jour grâce à la prise en compte de ces données qualifiées d'hétérogènes ou mixtes à cause de leur provenance, et à l'exploitation de la synergie qui découle de tels regroupements. Une contrainte de ce type d'association est que l'on dispose d'images prises de capteurs différents embarqués sur des plates-formes différentes : les géométries d'acquisition diffèrent donc fortement. Il en découle certaines contraintes non négligeables.

Le terme de **fusion**, utilisé pour nommer cette nouvelle approche, n'est pas le mieux choisi à mon avis. Car il englobe également toutes les initiatives, quant à l'étude conjointe de données provenant de sources variées, dans les études de télédétection spatiale qui ont précédées. Stratégie qui a été mise en application depuis fort longtemps, ne serait-ce qu'au travers des analyses de données multimodale (support cartographique, mesure *in situ*, réponses spectrales). Toutefois ce terme a été redéfini ces dernières années comme terme générique qui regroupe les nouvelles études prenant en compte des **informations multicapteur** (Document GdR TDSI, 1991).

Le problème que l'on se pose au travers de cette nouvelle démarche n'est pas trivial, à savoir comment maîtriser toutes les caractéristiques de chacune des données dans une opération de fusion, afin de déduire un résultat cohérent et physiquement exploitable (Mangolini, 1994). Les trois premières caractéristiques majeures dont il faudra se préoccuper sont : la fenêtre spectrale d'observation de la mesure, la résolution de la mesure (incluant son incertitude) et enfin l'instant d'acquisition de la mesure. La recherche de la meilleure combinaison des données revient à élaborer une stratégie de fusion pour obtenir une synergie maximale de celles-ci, en fonction de leurs caractéristiques propres. Une des étapes préliminaires consiste donc à définir un **processus de fusion**. Puis à déterminer à quel moment de ce processus, chaque type de données sera pris en compte. Et enfin, conditionner les données d'entrée au processus. Pour cela il est nécessaire au préalable de bien connaître l'apport individuel de chaque type de données afin de veiller à ce qu'elles collaborent au mieux, mais aussi de surveiller une quelconque rivalité entre elles.

Avant même de pouvoir exploiter des données mixtes, ces dernières doivent souvent subir des pré-traitements individuels, adaptés en fonction de leurs origines, mais aussi en fonction du temps dont on dispose pour l'exploitation. C'est ce qu'on appelle le conditionnement, ou l'alignement (Pau, 1988). En ce qui concerne les problèmes rencontrés lors de la manipulation des images optique et radar, si de nombreux outils classiques sont à notre disposition pour le traitement des images optique, il n'en va pas de même pour le traitement des images radar. Ces pré-traitements consistent bien souvent en des **corrections radiométrique et géométrique** appliquées sur les images dites "brutes". Parmi les pré-traitements spécifiques appliqués sur les images radar, certains outils nouveaux seront développés, semblables ou non, à ceux déjà employés pour le compte des images optique. De plus, les images optique dont l'interprétation est plus aisée, seront utilisées pour guider le traitement des images radar, si possible.

Lorsqu'on évoque l'utilisation conjointe d'images optique et radar pour le traitement des images radar, la fusion peut être vue comme un outil qui s'applique de deux manières différentes sur des données mixtes (données multicapteur).

Dans le premier cas elle peut agir par "**inférence**", c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interférence entre les données mixtes. Certaines données jouent un rôle d'assistance pour améliorer l'exploitation des autres, mais il n'y a pas de couplage physique entre celles-ci. Un exemple d'inférence présenté dans la thèse est le cas où l'on utilise des renseignements issus de l'imagerie optique pour améliorer la qualité du ré-échantillonnage d'une image radar. Ce genre d'approche a également été utilisée dans les travaux de Mangolini, Ranchin, et Wald (Mangolini 1994 ; Ranchin 1993; Mangolini *et al.*, 1993) pour leur concept d'amélioration de la résolution spatiale d'images à l'aide d'autres images de meilleure résolution, avec une application particulièrement réussie aux images SPOT. Un autre exemple simple est tiré des mêmes auteurs pour SPOT et ERS. Dans une image SPOT, sont présentés de manière distincte les pixels pour lesquels l'imagerie radar présente une énergie rétrodiffusée forte et quasi-ponctuelle dans l'espace. A cause de sa grande lisibilité, l'image SPOT sert de support géographique au photo-interprète qui doit analyser les raisons de ces échos.

Dans le deuxième cas la fusion peut agir sous forme d'une **incorporation** générale, c'est-à-dire que les données sont réunies et confrontées. Elles prennent toutes part physiquement à l'obtention du résultat, et ce, de manière instantanée ou chacune à leur tour. Suivant la situation et le stade du traitement, des données pourront être déclarées ancillaires vis-à-vis d'autres rivales dans certaines étapes, et vice-versa à d'autres stades du traitement. Ici un des grands problèmes soulevés parfois, porte sur l'évaluation d'un **degré de confiance** pour chaque donnée afin de choisir la plus réaliste à un instant donné. En ce qui concerne la "fusion par incorporation" on donnera pour exemple dans cette

thèse une application menée sur le sujet suivant : assimilation de données contemporaines ou non dans un modèle de croissance végétale. Dans ce cas, les mesures optique et radar sont confrontées lors de l'analyse afin de déduire un résultat commun plus riche et/ou plus affirmé. Les méthodes usuelles de classification font partie de ce cas, qu'elles soient supervisées ou non. Il en va de même pour les méthodes d'assimilation de données dans des modèles numériques. Ces méthodes ont déjà atteint un grand degré d'opérationnalité en météorologie (voir par exemple la thèse de Van den Berghe, 1992) mais restent expérimentales dans beaucoup d'autres domaines (voir par exemple Méaille et Wald, 1990 sur l'urbanisme).

Bien entendu, des cas mixtes peuvent être facilement trouvés, comme par exemple, une prise de décision dans des cas délicats d'attribution de classe, (incorporation) qui pourrait se prendre par analyse de la loi de comportement d'une variable extérieure (inférence).

Des exemples d'applications visant à exploiter les caractères **redondants** ou **complémentaires** sont utiles, afin de cerner l'ampleur des travaux qui peuvent découler d'une opération de fusion. Ils permettent d'apprécier les manipulations effectuées sur les données, notamment dans les phases de conditionnement. La considération des besoins de la communauté scientifique aide à définir un axe de recherche d'intérêt pour poursuivre son action dans les études faisant intervenir des informations multicapteur. Elle permet également de justifier le travail de recherche entrepris vis-à-vis de ces besoins formulés, et par la même d'introduire ce mémoire.

De nombreuses applications de fusion d'images optique/radar ont été explorées, grâce à la promotion faite des images radar (Acte du colloque SPOT-ERS, 1993). Une large diffusion des images radar ERS auprès des équipes de recherches travaillant dans des domaines très variés a permis au travers de projets pilotes d'expérimenter de nouvelles voies pour croiser ces informations atypiques. Bien souvent les travaux entrepris, considéraient comme point de départ des images optique/radar superposables, ou tout du moins géoréférencées. Dans le cadre de cette thèse les efforts ont été portés sur l'étape préliminaire à un grand nombre d'expériences de fusion, à savoir la mise en correspondance des images qui reste un problème d'actualité. Une attention particulière a été accordée à la qualité des images géoréférencées, sachant que les traitements qu'elles subissent dégradent fortement l'information originale.

Le corps de cet ouvrage s'articule en quatre parties distinctes. Dans un souci de clarté, de nombreux termes définis par des travaux antécédents seront repris, et accompagnés de leur référence.

Le travail de cette thèse n'a pas été réalisé dans le but de résoudre des problèmes fondamentaux rencontrés dans le monde de la recherche pure. La position des centres de recherche de l'Ecole des Mines de Paris entre le monde de la recherche et le monde industriel fait que l'orientation des thèses porte essentiellement sur le développement de procédés applicatifs. Les recherches entreprises visent à répondre aux problèmes rencontrés dans l'industrie.

La première partie sera consacrée à la description des données utilisées dans cette étude. Une **description sommaire des capteurs imageurs radar et optique et de leurs modes d'acquisition respectifs** sera faite. Cette partie permettra de décrire les qualités maîtresses des données qu'ils fournissent. Elle constituera également, un support pour mieux expliciter les traitements qui ont été appliqués à leurs images.

Ensuite, une discussion sur la **fusion de données dans le domaine de la télédétection spatiale** sera abordée et constituera la deuxième partie. Cette partie est consacrée à l'analyse de divers processus de fusion afin de positionner l'action principale de ce travail de recherche. Le besoin de se situer dans le monde de la fusion optique/radar nécessite de définir l'espace dans lequel on évolue. Cet espace peut être découpé en trois sous-ensembles qui sont appelés : **fusion de décision** (Lefèvre *et al.*, 1994), **fusion d'attribut** (Schmidlin *et al.*, 1993, ou encore Cihlar *et al.*, 1992) et **fusion de pixel** (Harris *et al.*, 1990, ou encore Houzelle *et al.*, 1991). Par la suite deux de ces processus seront explorés en détail par le biais d'applications réalisées dans le cadre de cette thèse.

La **fusion d'attribut** sera abordée avec l'appui d'une application concrète qui a été réalisée dans le domaine de l'agriculture. Des mesures optique/radar sont considérées. Chaque mesure reste indépendante, seuls les attributs qui en sont extraits participent à l'opération de fusion. Les attributs caractérisent l'état du peuplement végétal d'une parcelle agricole et sont fonction du temps. L'instant d'acquisition est alors très important. Certains attributs redondants sont utilisés pour comparer la qualité d'une mesure vis-à-vis d'une autre. Quant aux attributs complémentaires ils permettent de compléter les connaissances sur l'état de santé du végétal et son stade de croissance. A un instant donné, pour une parcelle donnée, on dispose d'un ensemble d'attributs qui permet de dresser un diagnostic grâce à une interprétation biologique. Ce travail est issu d'une collaboration avec l'université d'agriculture de Wageningen (Pays-Bas). Un exposé complet de cette expérience constituera la troisième partie.

Par la suite, la **fusion de pixel** a été longuement étudiée. Le point de départ ici consiste à disposer d'**images optique/radar superposables**. On désire réaliser une analyse très fine, on s'intéresse à l'information multispectrale (optique/radar) contenue dans chaque pixel. Ce n'est plus

comme dans le cas précédent où il s'agissait de manipuler des attributs issues de mesures optique/radar indépendantes, c'est-à-dire n'appartenant pas au même système de représentation. Ici la fusion a lieu au niveau du pixel, par conséquent, toutes les images (optique/radar) doivent être ramenées dans le même système de représentation suivant une projection identique. Ce travail sera décrit dans la quatrième partie. La mise en correspondance de données hétérogènes telles que les images optique/radar pose encore de sérieux problèmes. Le nombre d'industriels aptes à fournir un jeu de données multispectrale superposables est très restreint. La somme des difficultés rencontrées lors de la réalisation d'une telle tâche en est la cause.

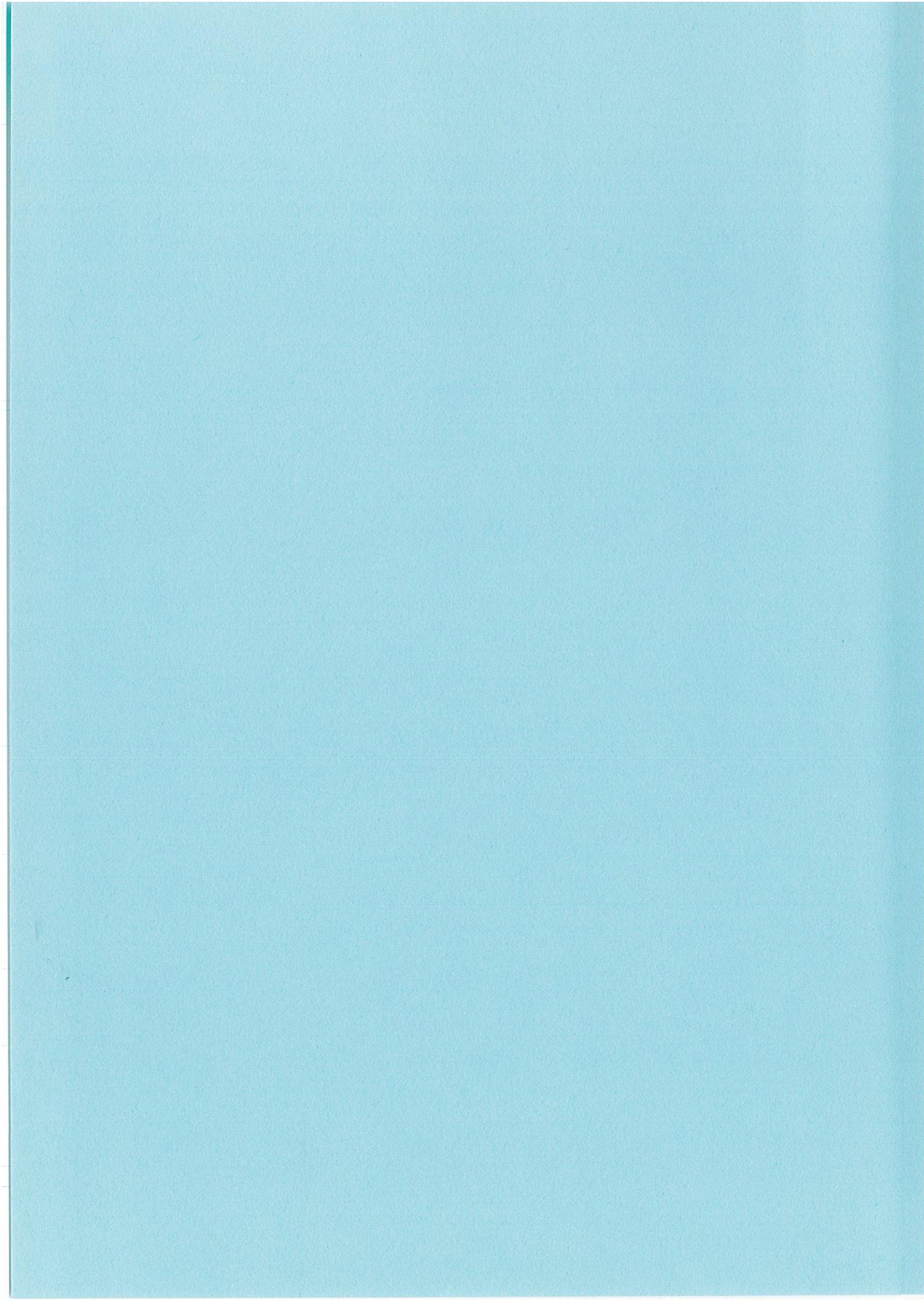
Nos efforts ont été essentiellement concentrés sur la représentation d'images optique et radar dans un référentiel commun. Les impératifs pour une application de fusion de pixel sont les suivants : les images multispectrale qui illustrent la même portion de Terre doivent être co-géoréférencées et de plus superposables. Aussi le choix d'un **repère unique** pour la représentation de ces images est important, et sera l'objet d'une discussion. Ensuite, la méthode mise en oeuvre pour obtenir une **ortho-image radar** sur des régions au **relief très accidenté**, est décrite point par point.

Enfin un dernier volet est consacré à la présentation des résultats mené sur un site. Ce dernier recouvre la **région de Briançon** (englobant le massif des Ecrins avec des sommets dépassant les 4000 mètres d'altitude et l'étroite vallée de la Durance). Le relief caractéristique de cette région a constitué un excellent échantillon pour tester nos algorithmes. L'expérience acquise dans le cadre du traitement de l'imagerie optique a contribué fortement à l'aboutissement de la nouvelle approche proposée. Ces compétences ont largement guidé nos pas, de même que la fusion de données en tant qu'**outil de conditionnement** pour les images radar, a su apporter des solutions à certains problèmes rencontrés.

Au cours des recherches effectuées, l'**analyse multirésolution** a été mise à profit chaque fois que l'opportunité s'est présentée. En effet, cet outil très puissant se révèle être un atout essentiel lorsque l'on a affaire à des manipulations multi-échelle d'une part, et d'autre part lorsque l'on s'intéresse à des données multicauteur, (voire ne serait-ce que multispectrale), on se trouve souvent en présence d'images de résolutions différentes.

La fusion de données intervient dans de nombreux domaines. L'étude des propriétés intrinsèques (nature physique des données) et extrinsèques (conditionnement des données) permet de développer un protocole de fusion. Les exemples couverts lors de ces travaux ont permis la mise à jour

d'enseignements qui seront regroupés dans la conclusion. Les démarches effectuées, opérationnelles pour une application précise, peuvent être parfois transposées à d'autres domaines d'application. Les cas traités ici relèvent de la fusion multicapteur en imagerie satellitaire mais certains résultats recueillis restent valables pour d'autres cas d'imagerie.



Chapitre 2

A PROPOS DES CAPTEURS IMAGEURS EMBARQUES SUR LES SATELLITES : SPOT & ERS-1

2.1 INTRODUCTION

Les satellites de télédétection civils SPOT et ERS, sont voués à l'observation de la Terre. Ils évoluent sur une orbite quasi polaire dont la forme est quasi circulaire. L'altitude moyenne pour ce genre d'orbites nommées orbites basses, se situe autour de huit cent kilomètres. Les orbites basses permettent de couvrir toute la surface terrestre en une période de temps relativement courte. Ce qui offre l'immense avantage de repasser au dessus d'une même portion de sol avec une fréquence de passage assez élevée. Cette caractéristique présente un grand intérêt pour le suivi d'un phénomène évolutif sur plusieurs jours voire sur plusieurs mois. Les orbites basses permettent d'atteindre d'autres performances (tributaires de l'altitude) et notamment une excellente résolution spatiale de quelques mètres.

La connaissance des instruments de mesure embarqués à bord des satellites est également primordiale. La qualité et la précision des mesures réalisées, dépendent de la définition des appareils. Mais les traitements postérieurs que subissent les mesures sont tout aussi importants car ils doivent préserver au mieux les mesures originales. Ces traitements sont liés aux caractéristiques des appareils et de leurs mesures. Aujourd'hui des traitements de plus en plus complexes sont appliqués sur les données afin d'extraire des enseignements de plus en plus riches. De la mesure physique enregistrée par l'appareil, il est nécessaire très souvent de déduire des paramètres de nature différente qui sont à l'origine de la mesure. Des traitements sont alors élaborés pour faire le lien entre les paramètres observables (soit la mesure) et des quantités, intrinsèques à la surface terrestre (soit des conclusions). L'utilisation des données issues de la télédétection spatiale peut être aussi limitée par la nature des paramètres observables. L'évolution rapide des techniques d'acquisition et d'analyse a permis à la télédétection spatiale de pénétrer de nombreux domaines. Si bien qu'aujourd'hui il nous serait difficile de dresser une liste complète des applications qui font appel à la télédétection et/ou à un de ses produits dérivés.

La qualité d'une image est liée non seulement à l'instrument dont elle est issue, mais aussi au dispositif sur lequel est placé l'instrument. Les conditions de mesures font intervenir des connaissances très variées, que ce soit sur le plan orbitographique : évolution de la plate-forme, évolution de l'objet mesuré (mécanique céleste) ou que ce soit sur le positionnement de la plate-forme, c'est-à-dire la stabilité du satellite pendant l'acquisition des mesures. A celles-ci, il faut également ajouter les connaissances liées à la mesure physique effectuée : quantité mesurée et quantité observable, au processus d'étalonnage, mais également des connaissances sur l'environnement dans lequel est réalisée la mesure c'est-à-dire l'interaction avec le milieu traversé : l'atmosphère. Lorsqu'on est amené à discuter de la qualité d'une image, deux critères sont discutés : la qualité géométrique et la qualité radiométrique. Il est rare voire difficile de concilier à la fois ces deux critères, seule l'application envisagée permettra d'attribuer une préférence pour l'un ou l'autre.

Les outils disponibles pour le traitement des images SPOT étant très diversifiés, l'accent a volontairement été porté sur l'analyse des images radar de type ERS. Aussi la présentation des caractéristiques des capteurs imageurs embarqués sur SPOT sera brève, tandis que nous nous étendrons plus longuement sur celle du radar imageur embarqué sur ERS.

2.2 LE SYSTEME SPOT : le premier satellite de télédétection spatiale français

Le programme de télédétection spatiale SPOT est devenu opérationnel en 1986, avec la mise à poste du premier satellite SPOT-1. Depuis lors, ce programme spatial dont la continuité a été assurée par le lancement des satellites SPOT-2 en 1989, puis de SPOT-3 en 1994, a connu un vif succès.

Ce satellite se déplace sur une orbite héliosynchrone quasi polaire, à une altitude moyenne de huit cent trente kilomètres. A son bord deux capteurs imageurs passifs qui fonctionnent de manière indépendante et qui possèdent deux modes de prise de vue. L'orientation des scènes varie en fonction de la latitude et de l'angle de prise de vue. Ces capteurs peuvent effectuer deux types de visée : au nadir (visée verticale), et à l'oblique grâce à un dépointage latéral de l'instrument. Ce dernier mode de fonctionnement, moins classique et réservé à des applications particulières, permet de viser la Terre latéralement d'un angle inférieur ou égal à vingt sept degrés de part et d'autre de la verticale. De telles visées procurent des vues stéréoscopiques, mais aussi abaissent la fréquence de passage à sept jours au lieu de vingt six pour la visée au nadir (Cervelle, 1989).

Une image peut être décrite comme un ensemble de comptes numériques organisés sous forme d'une matrice. Chaque élément est défini par trois paramètres : sa position dans la matrice soit le numéro de la ligne et le numéro de la colonne, et sa valeur soit le compte numérique. La formation de cette structure est liée au mode de balayage du capteur. Les capteurs embarqués sur SPOT opèrent avec un balayage de type *Push Broom* (Leroy, 1991). Les dimensions de la barrette de détecteurs sont fixées de manière à couvrir une ligne entière de l'image. C'est-à-dire que le nombre de détecteurs sollicités constitue le nombre de colonnes de la matrice, si bien que tous les éléments d'une même ligne sont acquis au même instant. Quant à la formation des lignes, elle est assurée par le déplacement (ou défilement) du capteur sur son orbite. Pour cela il faut que la vitesse de l'instrument soit calée sur le temps nécessaire à chaque capteur pour intégrer les mesures et réaliser l'échantillonnage.

La caméra CCD utilisée est constituée d'une barrette de détecteurs alignés, choisis pour enregistrer des signaux de longueurs d'onde appartenant au domaine de l'optique. Les régions du spectre électromagnétique sélectionnées couvrent des portions différentes. Deux groupes peuvent être discernés : le premier est appelé mode panchromatique s'étale de 0,51 à 0,73 micromètres et le second est dit mode multispectral car il se compose de trois portions discrètes du spectre. Ces trois portions sont enregistrées séparément et correspondent aux fenêtres spectrales suivantes : XS1 allant de 0,5 à 0,59 micromètres puis XS2 allant de 0,61 à 0,68 micromètres et enfin XS3 allant de 0,79 à 0,99 micromètres. Les résolutions spatiales sont différentes pour les deux modes. En mode panchromatique la résolution spatiale nominale est de 10 mètres, quant au mode multispectral la résolution spatiale nominale est de 20 mètres (Guide des utilisateurs SPOT, 1986).

Ces longueurs d'onde ont été sélectionnées en fonction des mesures que l'on désirait accomplir à dessein de réaliser des applications dans des domaines bien particuliers. Cependant les mesures dans ces longueurs d'onde sont tributaires des conditions météorologiques. Une couverture nuageuse très dense, fréquemment rencontrée dans les régions équatoriales et subtropicales, rend l'atmosphère totalement opaque. La présence ou non de nuages conditionne les prises de vue et constitue un facteur de qualité lors de l'exploitation des images. Outre les régions nuageuses, les régions sub-polaires ne peuvent être observées. L'indence trop rasante des rayons du soleil ne permet pas aux détecteurs d'enregistrer une réponse spectrale significative en provenance de ces régions terrestres situées dans la pénombre.

Le capteur enregistre une mesure proportionnelle à la quantité d'énergie détectée par le détecteur. Les valeurs mesurées subissent une quantification afin de représenter les mesures sous forme numérique. Par la suite il est possible de retrouver par des opérations inverses la quantité d'énergie détectée par l'instrument, que l'on appelle luminance. A partir de cette grandeur physique, on déduit les paramètres caractéristiques de la surface terrestre.

Les déformations géométriques apparentes sur l'image sont généralement minimales. Elles résultent de l'angle d'ouverture sous lequel est vue la portion de Terre. Les stations de traitements appliquent sur les images brutes recueillies des processus de rectifications géométriques et radiométriques. La société de distribution des images SPOT propose des produits de différents niveaux de traitement adaptés à l'utilisation à laquelle ils sont destinés (Cartographie spatiale, 1989).

La manipulation aisée de ces données numériques et la richesse des informations extractibles, justifie l'essor qu'a connu la télédétection spatiale optique ces dernières années. Des traitements de plus en plus sophistiqués, ont permis à cette nouvelle technologie d'évoluer. La photo-interprétation de ces images optique ne constitue plus une limite, mais un résultat intermédiaire. Aujourd'hui le résultat d'une telle opération est très souvent assimilé dans des processus complexes (modèle numérique) avec des données de sources exogènes afin de déduire un résultat plus approfondi. En effet l'aptitude des données optique à s'immiscer dans les études utilisant les outils classiques comme des cartes géographiques, ou des relevés de terrain ont favorisé l'introduction de l'image optique dans de nombreux domaines. Cette nouvelle source d'information est dans bien des cas devenue une base indispensable à la prise de décision dans les milieux économiques et politiques (agriculture, renseignement). L'imagerie optique comprend à la fois des images acquises dans le domaine du visible et dans le domaine de l'infra-rouge. Très vite on s'est intéressé à la mixité de ce type de données. De là à utiliser les autres supports offerts par le développement des nouvelles technologies, il n'y avait qu'un pas. Aussi un nouveau défi a été formulé par l'introduction des images radar.

Remarque : La dénomination de capteur optique passif sera limitée à la catégorie des systèmes d'acquisition les plus répandus en observation de la Terre : le *Push Broom*, ou le balayage cylindrique.

2.3 ERS-1 : le premier satellite de télédétection spatiale européen

2.3.1 Introduction

Le programme de télédétection spatiale ERS est devenu opérationnel en 1991, avec la mise à poste du premier satellite ERS-1. Ce satellite se déplace sur une orbite quasi polaire, à une altitude moyenne de sept cent quatre vingt cinq kilomètres. Il s'agit d'une orbite héliosynchrone. A son bord de nombreux instruments dont un diffusiomètre, un radiomètre micro-onde, un radar à synthèse d'ouverture, initialement destinés à la mesure de paramètres océano-météorologiques à la surface de l'océan (Cavanié *et al.*, 1994). Nous nous sommes intéressés au capteur imageur actif AMI (*Active Microwave Imageur*), appelé radar à synthèse d'ouverture, ou plus usuellement SAR selon l'acronyme en langue anglaise. Le principe actif de ce type d'instrument permet de réaliser des acquisitions de mesures de jour comme de nuit, elles peuvent avoir lieu aussi bien dans la phase ascendante que descendante de l'orbite (document ESA, 1991). La perception originale de la surface terrestre offerte par cet instrument imageur fait que les images qu'il produit ont été détournées de leur but premier.

Nous allons décrire le fonctionnement de cet instrument capable de fournir des images de la surface terrestre. Ce radar a été choisi pour émettre un signal à la fréquence de 5,3 GHz (hyperfréquences, $\lambda \approx 5,3$ cm), et de polarisation VV. L'atmosphère est considérée comme un milieu de propagation transparent qui ne modifie pas de manière significative ce type de signal. C'est un argument majeur qui a motivé la construction de ce capteur imageur. Les régions confrontées à une couverture nuageuse relativement dense, pendant une grande partie ou la quasi-totalité de l'année, comme les régions équatoriales et subtropicales ne peuvent être suivies par le seul biais de l'imagerie optique (Rudant, 1994). La déficience des systèmes optiques pour imager les régions polaires et sub-polaires a également favorisé l'essor de l'utilisation de l'imagerie radar dans les domaines de la glaciologie (Steffen, 1992 ; Manore, 1992).

L'étiquette de capteur "tout temps, tout instant" a été associée à ce type de capteur. Cette grande liberté d'action a suscité un vif intérêt, mais a été quelque peu altérée d'une part, par l'aspect des images difficiles à interpréter pour un néophyte, et d'autre part, même si les conditions climatiques n'entrent pas directement en ligne de compte, elles peuvent tout de même engendrer des perturbations au niveau des mesures effectuées. Les conditions climatiques interfèrent de façon indirecte en modifiant la valeur de certains paramètres, extraits des mesures, et utilisés pour l'interprétation des scènes radar. En effet lorsqu'on se livre à une analyse scientifique de la mesure effectuée par le SAR (coefficient de rétrodiffusion), on déduit des informations sur les propriétés

physiques (diélectrique, ...) des objets. Celles-ci peuvent être dépendantes des conditions météorologiques extérieures. On peut citer pour exemple l'influence du taux de précipitation, ou de l'ensoleillement (qui modifie le contenu en eau des objets observés) sur la constante diélectrique.

Après avoir évoqué quelques caractéristiques de la plate-forme qui influencent le fonctionnement de l'instrument imageur, et après avoir introduit l'instrument nous allons maintenant discuter des mesures qu'il effectue. Ces commentaires sont utiles car la perception des objets au travers d'un capteur imageur radar est assez complexe. Aussi l'analyse de la formation d'une image permettra de justifier par la suite les étapes de traitements qui sont appliqués sur celle-ci.

2.3.2 Formation d'une image SAR : formalisme

La modélisation d'un instrument imageur tel que le SAR peut être décomposée en plusieurs modules. Ici nous avons pris soin de différencier trois fonctions qui formalisent la formation d'une image SAR. Cet ensemble de fonctions $\{f, g, f'\}$ permet de simuler l'acquisition d'une image radar au dessus d'une portion de sol. Chaque fonction correspond à un module de traitement qui sera détaillé ultérieurement.

La première fonction f représente la fonction de localisation de l'instrument et correspond à la modélisation géométrique de la prise de vue. Elle prend en compte l'évolution de la plate-forme ainsi que celle de la Terre pendant l'acquisition d'une image, et décrit le processus d'acquisition de l'instrument qui permet de créer une image à deux dimensions de la surface terrestre. Les équations qui décrivent la fonction f permettent d'écrire un premier modèle numérique qui réalise le passage entre les coordonnées d'un point sur la Terre et les coordonnées de ce même point sur le plan image et cela quelque soit un point appartenant à un ellipsoïde de référence. Ces équations sont paramétrées par un ensemble de quantités physiques dont les valeurs nominales sont connues avec une certaine précision, aussi cette modélisation géométrique devra être affinée.

Puis vient la considération de la surface observée, une portion de Terre avec des particularités propres à chaque objet (dues à la diversité des thèmes et de l'orographie des portions de sol observés). Il s'agit ici de réaliser la modélisation radiométrique de la mesure. Différents cas d'imagerie qui seront illustrés par la suite appuieront la définition de cette fonction g . La fonction g est directement dépendante de l'information topographique disponible, de sa précision va dépendre la qualité radiométrique de la modélisation. Elle soulève des problèmes de ré-échantillonnage peu communs dans le cas de l'imagerie SAR.

Enfin la fonction f' est appliquée, elle assure le positionnement "exact" de l'image par rapport à la position de la portion de sol imagée. Elle permet de fixer l'origine du référentiel instrument par rapport au référentiel terrestre choisi, et de corriger les erreurs produites par la méconnaissance des paramètres nominaux utilisés dans le premier modèle géométrique.

L'ensemble des fonctions $\{f, g, f'\}$ qui modélise la création d'une image SAR a été décrit. La simulation d'une prise de vue SAR est réalisée par l'application de ces trois fonctions. Elle permet de se doter d'une image SAR dite synthétique. Le but ici n'est pas de détailler la formulation mathématique de chacune d'elle, mais de regrouper les phénomènes physiques à prendre en considération pour leur construction. On trouvera dans la bibliographie, une liste d'ouvrages dans lesquels est détaillée la mathématique de ces fonctions.

2.3.3 Principe de l'acquisition d'une image SAR : instrumentation

Le SAR est un capteur actif à visée latérale, qui émet un signal dans le domaine des longueurs d'onde appartenant aux hyperfréquences (Fitch, 1988). Il mesure la puissance rétrodiffusée par la portion de sol qui intercepte le signal émis. La mesure du coefficient de rétrodiffusion σ effectuée est de nature complexe, et décrite par deux grandeurs physiques la phase et l'amplitude. La valeur de σ est conditionnée par les caractéristiques diélectrique et géométrique de la cible.

La formation d'une image radar repose sur le principe d'une analyse temps/distance. L'image est obtenue par deux processus différents. Le signal hyperfréquence est émis sous forme d'impulsions brèves dont la fréquence de répétition particulière est fixée de façon à éviter le chevauchement des réponses à chaque impulsion (Fig. 2.1.a). Une impulsion correspond à une porte radar. La ligne "i" correspond à la réponse de la portion de sol interceptée par l'impulsion "i", ce qui est décrit sur la figure suivante par un diagramme (Fig. 2.1.b).

Le signal retourné est échantillonné avec une fréquence propre à l'instrument. L'intégration suivant la direction radiale est assurée par une analyse des échos retournés. Sur une ligne "i" donnée, chaque objet au sol est localisé par le temps d'aller/retour de l'écho, soit :

$$y_j = n_j \cdot \tau \quad (\text{Eq. 2.1}) \quad \text{où : } y_j \text{ est la coordonnée de l'objet dans la direction radiale,}$$

n_j est la position en colonne, du pixel correspondant,
 τ la durée équivalente de l'impulsion de l'onde analysante.

En pratique, les résolutions radiales de l'ordre de la dizaine de mètres sont obtenues par la technique de la compression d'impulsion qui dimensionne la porte radar (FM chirp, en anglais).

La synthèse de l'image repose d'une part sur l'analyse temps/distance des échos renvoyés, comme nous venons de le voir, et d'autre part sur l'analyse des décalages Doppler. La formation de la première dimension suivant la direction radiale est écrite sur la figure 2.1.c. Quant à la deuxième dimension, suivant la direction azimutale, sa description repose sur le principe de la synthèse d'ouverture. En effet, afin d'obtenir une résolution aussi fine que celle obtenue suivant la direction radiale, la dimension de l'antenne et le défilement du satellite sont mis à profit pour éclairer la surface au sol pendant un intervalle de temps plus long.

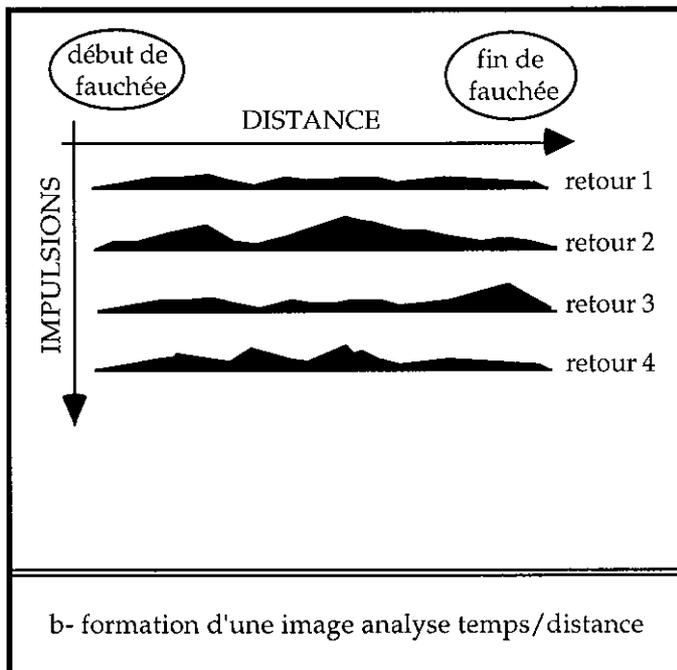
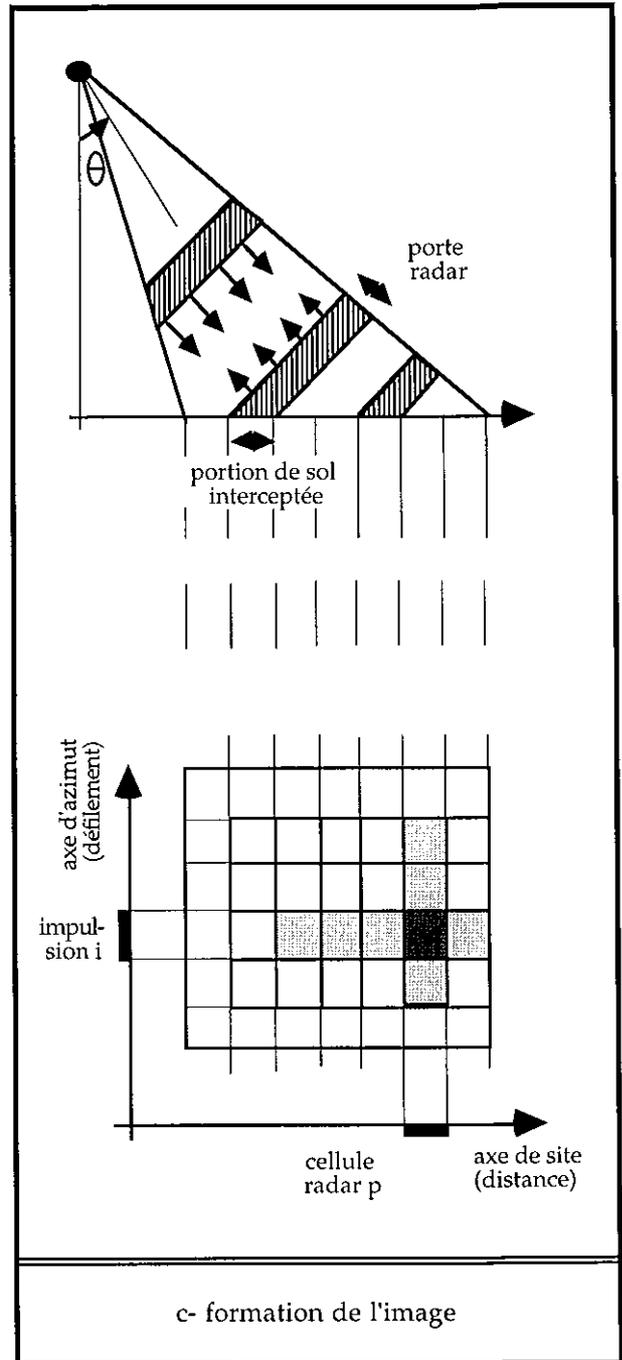
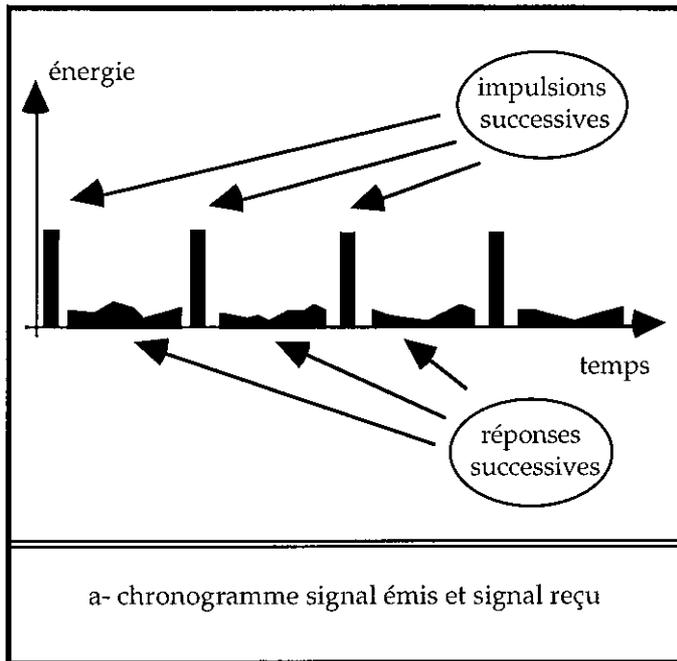


Figure 2.1 - Formation d'une image par un capteur actif tel que le radar à synthèse d'ouverture

La résolution du capteur dans la direction azimutale est obtenue en intégrant les échos renvoyés par les objets au sol, durant leur éclairage par le faisceau. Cette intégration est rendue possible par l'analyse des décalages Doppler des objets en fonction de leur position dans le faisceau. L'intégration du signal, effectuée sur un grand intervalle de temps, permet d'utiliser le mouvement

de translation du porteur pour synthétiser dans l'espace une antenne de grande ouverture. La figure 2.2 illustre le principe de la synthèse d'ouverture et décrit l'intégration de plusieurs empreintes générées par l'avancement du capteur. Ce principe permet d'améliorer la résolution azimutale de l'image.

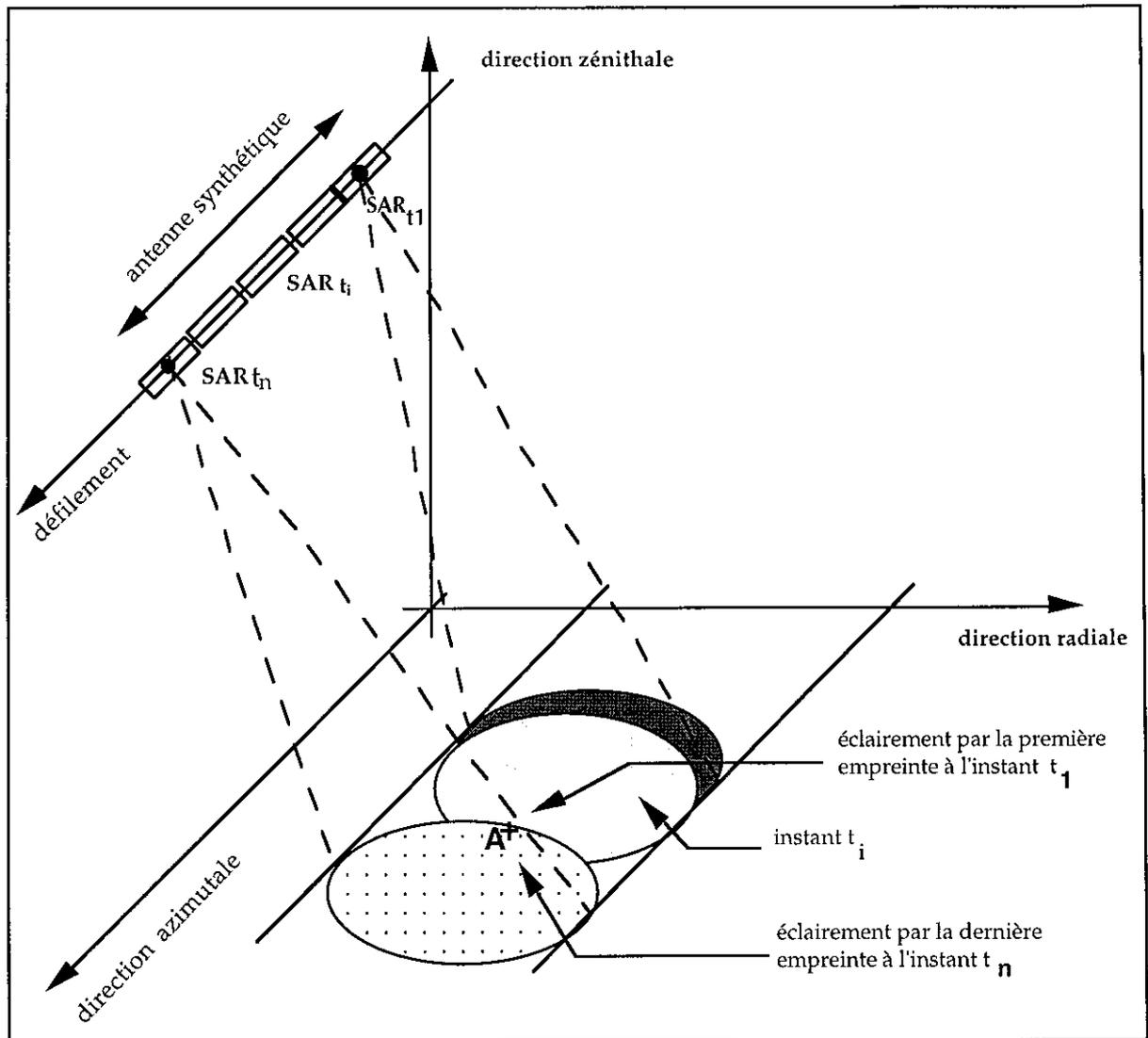


Figure 2.2 - Radar à synthèse d'ouverture (SAR)

Ainsi l'image du point A est synthétisée après l'intégration de ses échos depuis son entrée dans la première empreinte jusqu'à sa sortie dans la dernière empreinte. Le passage au zéro Doppler détermine l'instant où le satellite passe dans le plan situé à la verticale du point A et perpendiculaire à la direction azimutale.

L'image est donc représentée dans le référentiel de l'instrument dans un système de coordonnées constitué par un ensemble de lignes isodistances qui résulte de l'intersection d'une sphère avec une surface et par un ensemble de lignes isodopplers qui résulte de l'intersection d'un cône avec une surface. Ainsi la localisation d'un pixel sur l'image SAR est définie à partir de l'intersection de la surface terrestre par ces deux courbes qui décrivent les dimensions de l'image SAR :

- l'une intercepte la surface terrestre suivant une ligne d'isodistance,
- l'autre intercepte la surface terrestre suivant une ligne d'isodoppler.

2.3.4 Fonction de localisation f

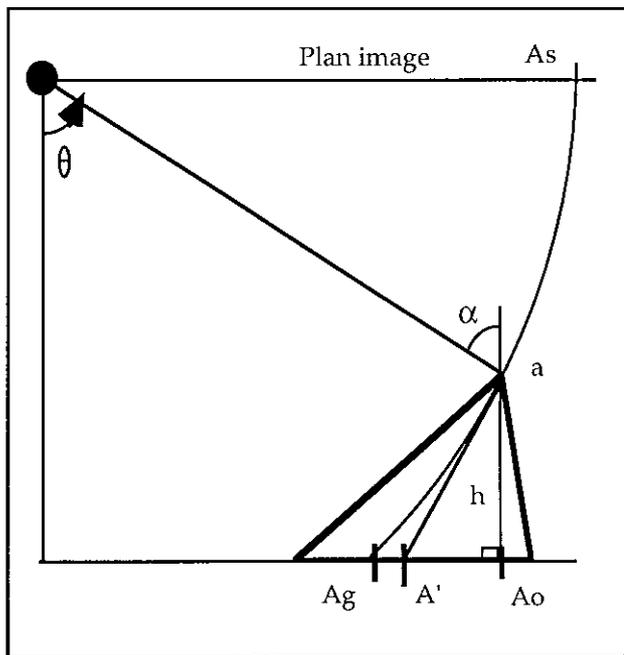
La fonction de localisation de l'instrument est définie à partir d'un ensemble d'équations géométriques. Ces équations permettent de localiser sur l'image la contribution de chaque objet éclairé, et modélisent la géométrie de prise de vue. Des grandeurs physiques sont reliées à l'aide de formules simples qui sont données dans le manuel des utilisateurs des données radar (Laur, 1992), associées aux paramètres orbitaux qui sont communiqués pour chaque scène (Guignard, 1991, Document ESA, 1991). Ainsi, à partir des coordonnées géographiques d'un objet de la surface terrestre sont déduites les coordonnées de ce même objet dans le plan image. Des paramètres géométriques de prise de vue conditionnent les qualités géométriques de l'image, et paramétrisent cette fonction de localisation. Ces paramètres caractérisent :

- la trajectographie du satellite,
- l'attitude du satellite,
- le fonctionnement de l'instrument,
- le trajet atmosphérique du signal.

La stabilité de la plate-forme pendant l'acquisition, mentionnée d'ailleurs par de nombreux utilisateurs d'image ERS, fait que les paramètres nominaux sont relativement bien connus, la méconnaissance de ces derniers entraîne une erreur qu'il est possible de corriger simplement. L'attitude de la plate-forme influence la position de pointé de l'antenne mais en général les écarts sont minimes et rapidement corrigés. Un paramètre important : le zéro Doppler, il marque le passage du plan de visée à la verticale du point visé à la direction azimutale. La géométrie de prise de vue quant à elle, est paramétrée par l'angle d'incidence. De plus comme nous avons pu le voir le fonctionnement de l'instrument repose sur le principe d'acquisition temps/distance, un paramètre important caractérise l'horloge (le stop start) soit le début de l'acquisition.

L'ensemble des phénomènes physiques qui peuvent engendrer des erreurs de localisation doit être modélisé. La méconnaissance des paramètres qui caractérisent ces phénomènes entraîne des erreurs de portée plus ou moins grande. En ce qui concerne les images issues du SAR embarqué sur le satellite ERS1, les paramètres instrumentaux fournis avec l'image, sont de haute précision et permettent de replacer l'image par rapport au point Nadir, par une simple opération de géolocalisation qui consiste à "naviguer" l'image. Une attention particulière est réservée à la détermination du zéro Doppler et de l'horloge qui définissent l'origine du référentiel instrument dans lequel est représentée l'image. L'influence de l'atmosphère sur le signal radar est souvent négligée.

Si l'altitude d'un objet n'intervient pas sur l'analyse de sa position en azimuth, elle modifie par contre sa distance radiale au capteur, et par là même sa position dans l'image. Les distorsions géométriques engendrées par la technique du "ranging" sur un relief accidenté constitue un point très important pour l'interprétation d'une image radar (Fig. 2.3).



Pour un point A donné nous avons réalisé quatre projections : Ao , As , A' et Ag .

Avec :

- Ao , la projection orthogonale du point a , sur un plan tangent au sol au centre de scène,
- As , la position de l'image de a , sur la direction radiale,
- Ag , la position de l'image de As , sur la direction de site,
- A' , représente la projection de a , sur l'axe de site (ground range) suivant la tangente au point a , à la direction radiale.

Figure 2.3 - Influence de l'orographie

avec, h : altitude du point considéré a , par rapport à un ellipsoïde de référence,

α : angle d'incidence,

θ : élévation sous laquelle est observée le point a .

Suivant le référentiel dans lequel on se place, la mesure des distances est différente. En comparant l'ensemble des projections associées à cette configuration de visée, nous allons décrire l'influence de deux paramètres majeurs qui sont : l'angle d'incidence α , sous lequel est vu le point considéré, et l'altitude h de ce dernier. Les variations de α , et de h , sont très importantes aussi est-il nécessaire de connaître précisément ces paramètres. Lorsqu'on voudra modifier l'espace de représentation d'une image nous devons gérer ces déformations de longueurs. Pour chaque point visé il nous faudra connaître la valeur du couple (α, h) . Ce renseignement permettra alors de construire le modèle de passage d'un référentiel à un autre tout en adaptant la projection adéquate, et ainsi veiller à corriger les aberrations de longueur en fonction de la projection choisie.

L'imprécision sur la valeur de α , est souvent due à la méconnaissance de l'orographie de la portion de sol imagée. Car l'élévation sous laquelle est réalisée la visée fait partie des paramètres instruments, bien définis pour le SAR de ERS-1. Même si la stabilité de ces paramètres offre une excellente géo-localisation, la dépendance avec la quantité h (altitude du point visé par rapport à l'ellipsoïde de référence) remet tout en question.

Dès qu'on cherche à procéder à une analyse fine, le calcul d'un angle d'incidence local est lié à la définition de la base topographique utilisée pour son calcul. Quant à h , la précision relative de cette grandeur, qui est directement liée à l'orographie du sol imagée, pose bien des soucis (Fig. 2.4). L'influence de l'erreur commise sur l'altitude h , pour le calcul de la position de la projection d'un point considéré, est loin d'être négligeable (Schreier *et al.*, 1990, ou encore Sylvander *et al.*, 1995).

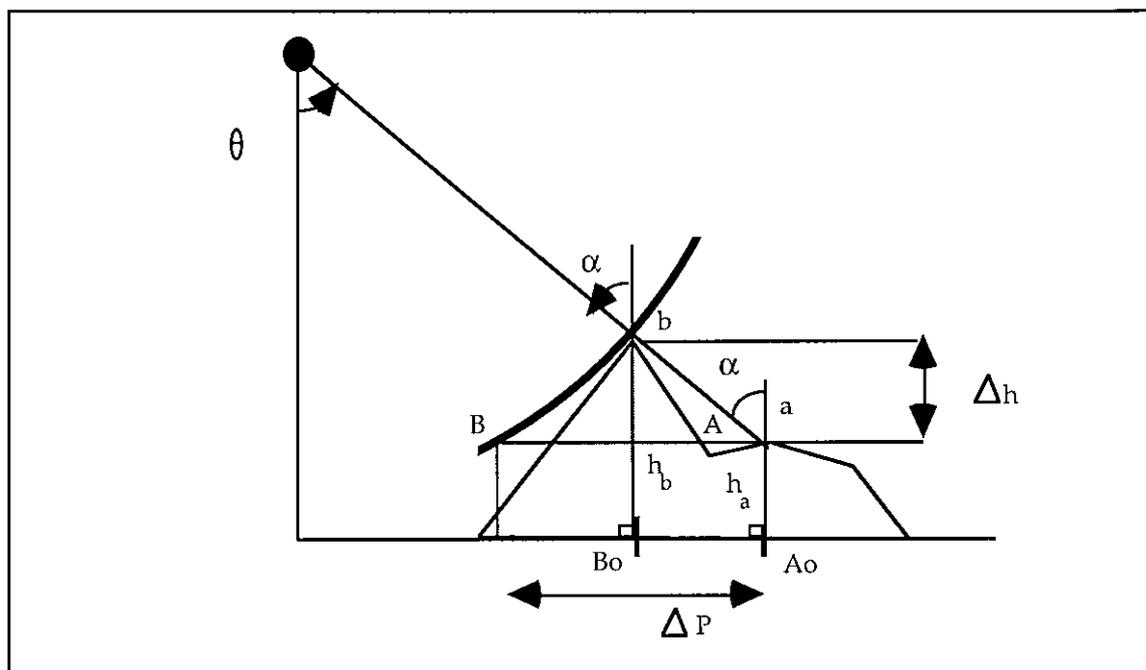


Figure 2.4 - Influence de la précision relative de h

En effet soit Δh l'erreur commise sur la connaissance de l'altitude considéré :

$$\Delta h = |h_a - h_b| \quad (\text{Eq. 2.2})$$

On pose : $\Delta P = d(A, B)$ avec $d(A, B)$, la distance qui sépare les images des points a, b dans le référentiel sol.

L'erreur sur h entraîne une erreur sur la position du projeté du point considéré, égale à :

$$\Delta P = \cot \alpha \cdot \Delta h \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Pour une valeur moyenne de α , prise au centre de scène ($\alpha = 23$ degré), on trouve la relation suivante :

$$\Delta P = 2,36 \cdot \Delta h \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) constituent les bases orographiques les plus utilisées. Un MNT se présente sous la forme d'une image et modélise une vue à trois dimensions d'une portion de sol. Les indices de ligne et de colonne fixent les coordonnées du point considéré dans le système de représentation choisie. Quant au compte numérique, il résulte du codage de l'altitude de ce même point. Le MNT est généralement caractérisé par sa résolution spatiale et sa résolution altimétrique, en fonction de la variabilité de l'orographie rencontrée sur la portion de sol étudiée. L'importance que l'on accorde à la qualité d'un modèle numérique de terrain, et à la précision altimétrique relative, se justifie par les calculs précédents (Polidori, 1995). Nous discuterons plus en détail, au chapitre 5 des qualités d'un MNT de la précision altimétrique absolue et relative qui sont des critères de qualité complémentaires. Ils seront requis en fonction de l'utilisation du MNT.

Les artefacts engendrés par de telles causes sont difficilement contournables car ils sont liés à la qualité de la base orographique dont on dispose. Le seul moyen est de se munir d'une information orographique de haute précision. Cette remarque renforce les commentaires à propos de la qualité géométrique d'une image radar. Très dépendante des formes du relief, elle est à même d'en donner une excellente reproduction pour qui sait réaliser l'interprétation. D'ailleurs par l'exploitation des techniques d'interférométrie sur un couple d'images SAR, il est possible de créer une base orographique de très bonne qualité. Mais à l'heure actuelle si des précisions relatives inférieures au mètre sont atteintes, il reste encore des efforts à fournir pour obtenir une précision absolue du même ordre de grandeur (Massonet, 1993). Cette limitation est également due à deux autres types d'artefacts, d'une part la modification du trajet troposphérique, et d'autre part les aberrations géométriques en présence de relief. Nous avons considéré comme négligeable la deuxième source d'incertitude, comparée aux effets produits par la troisième qui vont être détaillés maintenant.

2.3.5 Modélisation de l'observation de la surface terrestre, la fonction g

Ces considérations nous ont amené à traiter des cas synthétiques afin de cerner les différents cas d'imagerie et surtout afin de prévoir comment il était possible de rendre compte d'une simulation d'un signal radar à partir d'un modèle numérique de terrain. Mise à part l'influence de l'erreur commise sur la détermination du couple (α, h) , d'autres types de distorsions interviennent. Ces distorsions dues à la nature même de l'orographie du sol imagé, engendrent elles aussi, des aberrations de longueurs. Nous allons nous intéresser maintenant à la formation de l'image d'un ensemble de points. Cet ensemble de points est représentatif de l'orographie d'une portion de sol.

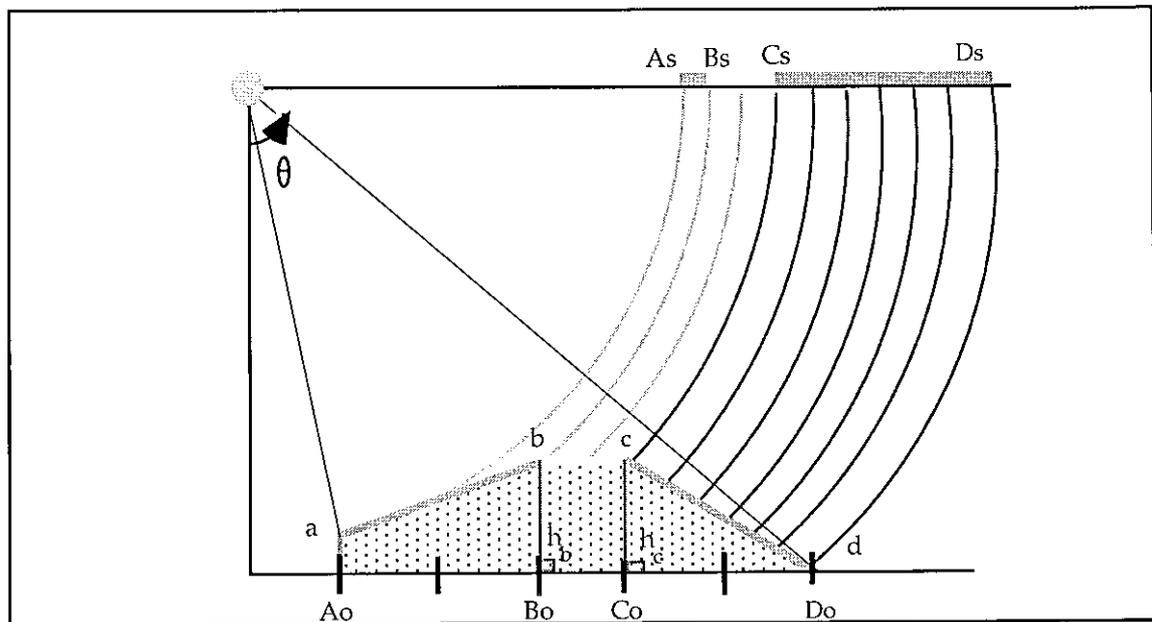


Figure 2.5 - Etirement, contraction des longueurs

Sur la figure ci-dessus (Fig. 2.5), nous avons voulu isoler un cas d'imagerie : les contractions et les dilatations de terrain qui apparaissent sur le plan image. Nous avons pris soin au début de différencier deux repères, l'un assujéti à la surface terrestre (ground range), et l'autre, assujéti à l'instrument (slant range). Nous nous apercevons ici de l'importance de cette dissociation, car suivant le repère que l'on choisit, nous n'aurons pas la même représentation. Ces distorsions sont bien sûr liées aux paramètres suivants : angle d'incidence (α), et altitude du point visé (h).

Les versants qui font face au capteur seront rétrécis sur l'image et apparaîtront très brillants car la mesure d'une grande surface sera confinée dans quelques cellules radar, voire une seule. Le principe de l'acquisition des mesures (principe temps/distance) fait que des puissances rétrodiffusées au même instant seront cumulées et enregistrées sur la même cellule radar. Quant aux versants opposés, ceux-ci au contraire sont dilatés. En effet comme la pente se trouve dans le prolongement de l'axe de visée, elle favorise l'étalement du faisceau en introduisant des écarts temporels entre les différents points rétrodiffusants. Ce phénomène permet un échantillonnage fin du signal retourné si bien que la taille du pixel (en terme de surface couverte au sol) est très petite.

Pour certaines valeurs extrêmes du couple (α, h), les distorsions engendrées sont peu communes et demandent d'ailleurs de la part d'un photo-interprète une grande expérience. Dès que le relief devient plus accidenté, l'interprétation des images radar est de plus en plus difficile : il n'est pas

rare de voir apparaître le sommet de la montagne avant sa base. Nous allons aborder deux cas d'imagerie : les inversions de relief, et les ombres portées (Fig. 2.6).

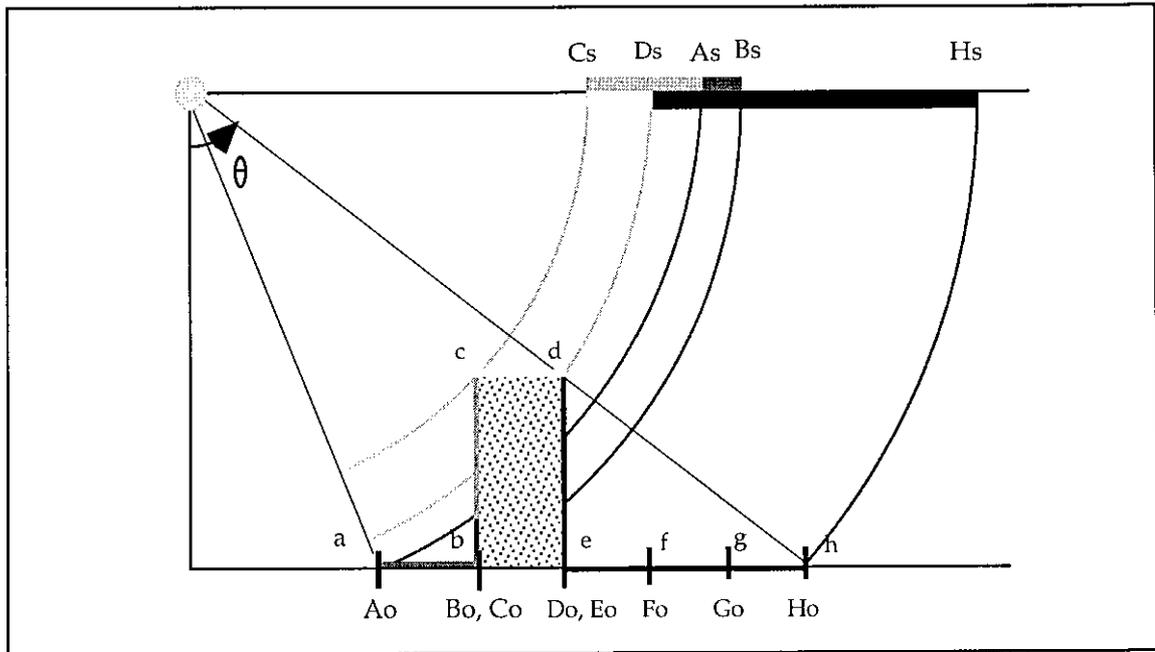


Figure 2.6- Raccourcissement du cône d'ombre

Pour le cas de l'inversion, la géométrie de prise de vue pour certains points est telle que l'enregistrement de la chronologie des échos ne correspond pas à la distribution spatiale des points suivant les distances "ground range" croissantes repérées sur l'axe de site. En effet si nous comparons la distribution ordonnée sur le sol des points {a, b, c, d, e, f, g, h} (repérés par rapport au point sub-satellite), avec la distribution de leurs images {Cs, Ds, As, Bs, Hs} (repérés par rapport à l'instrument), nous nous apercevons que l'ordre de certains points a été interverti. Ce phénomène correspond à un repliement, les images Cs et Ds ont devancé les images As, et Bs.

Connaissant la valeur des paramètres instrumentaux de visée, il est possible de définir les valeurs limites du couple (α, h) pour lesquelles ce cas d'imagerie sera rencontré. De manière qualitative nous pouvons déjà conclure que plus l'angle α est petit et plus la pente est grande, alors plus les inversions auront lieu. Les figures 2.7 et 2.8 illustrent quantitativement les valeurs limites du couple (α, h) pour lesquelles vont se produire ces cas d'imageries exotiques.

De plus ce phénomène est à l'origine des déplacements du relief qui ne se font pas comme sur une image conventionnelle optique prise en visée oblique. En effet lorsqu'on réalise une visée latérale

DIVERSES CONFIGURATIONS POUR LE COUPLE (α, p)

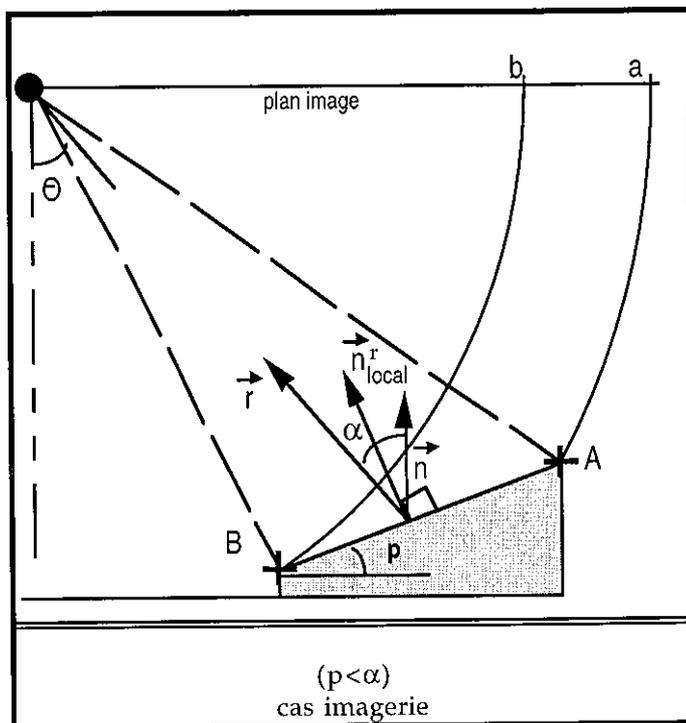
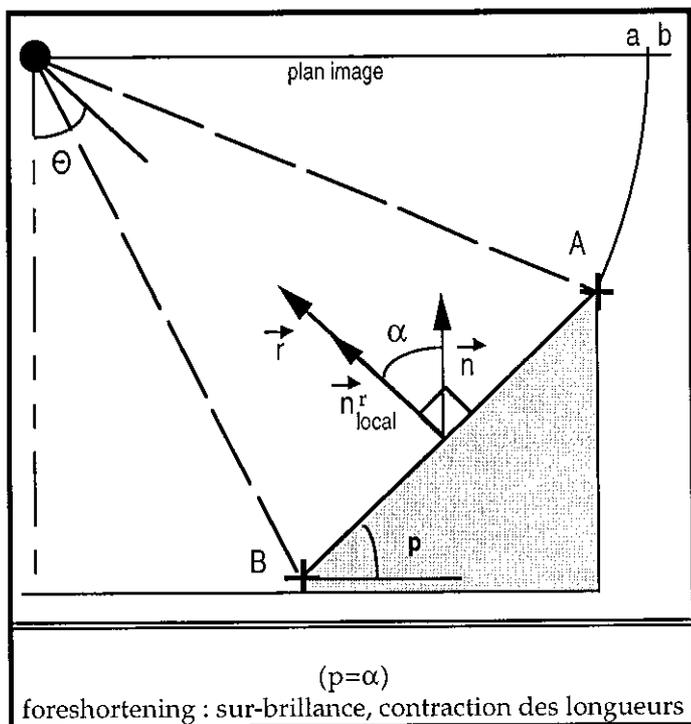
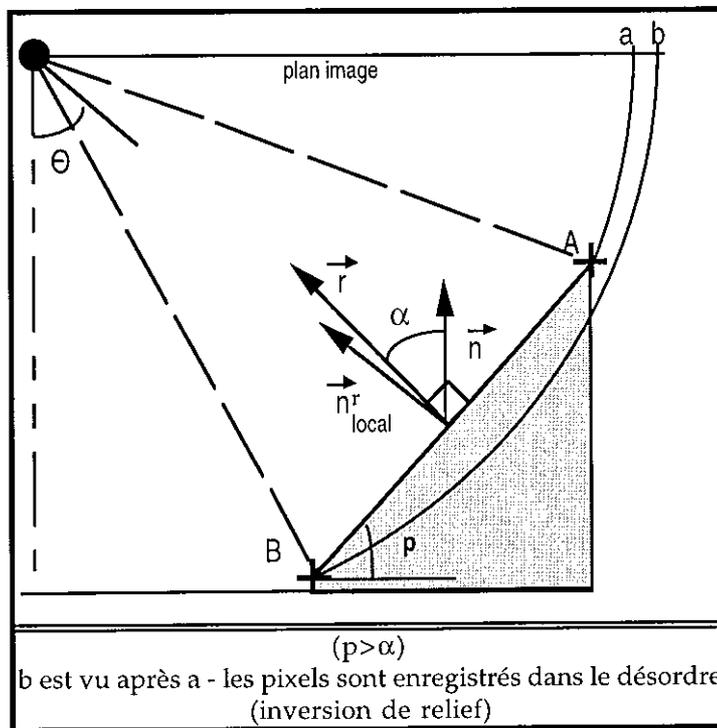


Figure 2.7- versant face au capteur : les Adrets

DIVERSES CONFIGURATIONS POUR LE COUPLE (α, p)

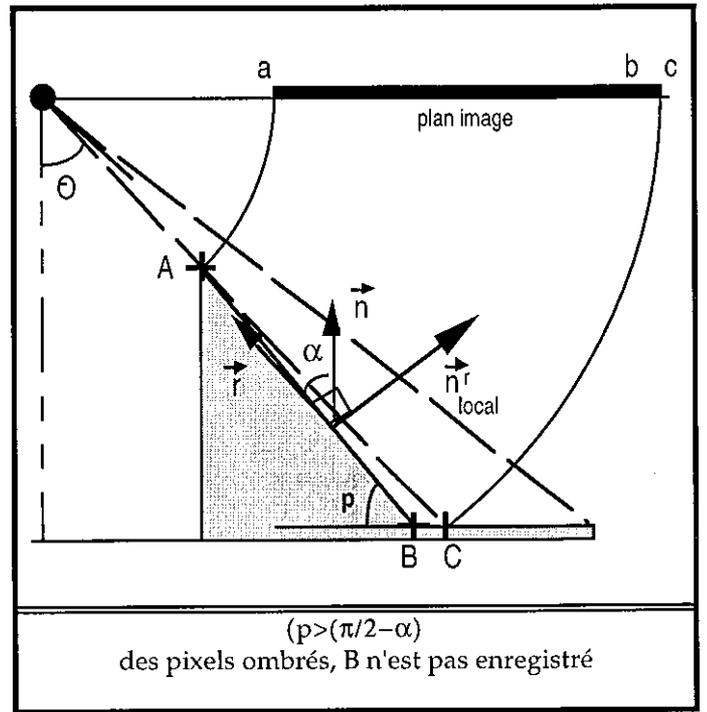
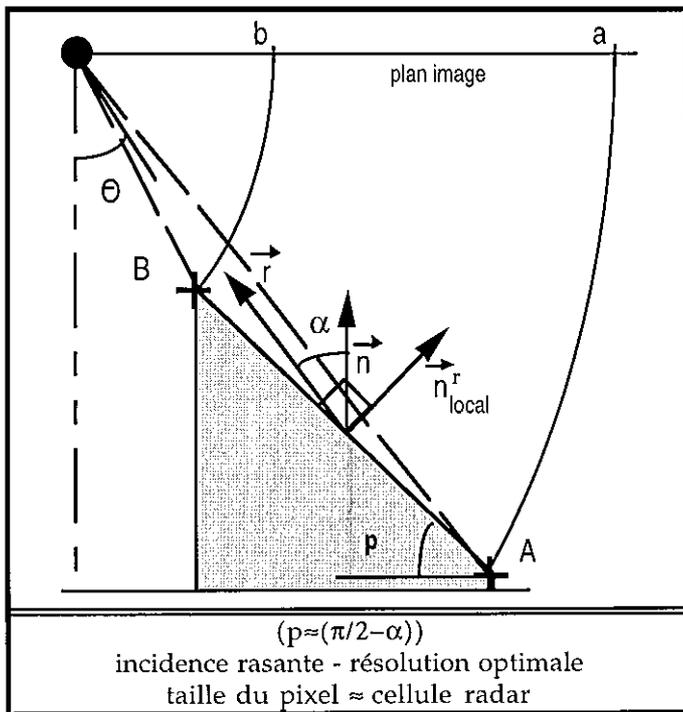
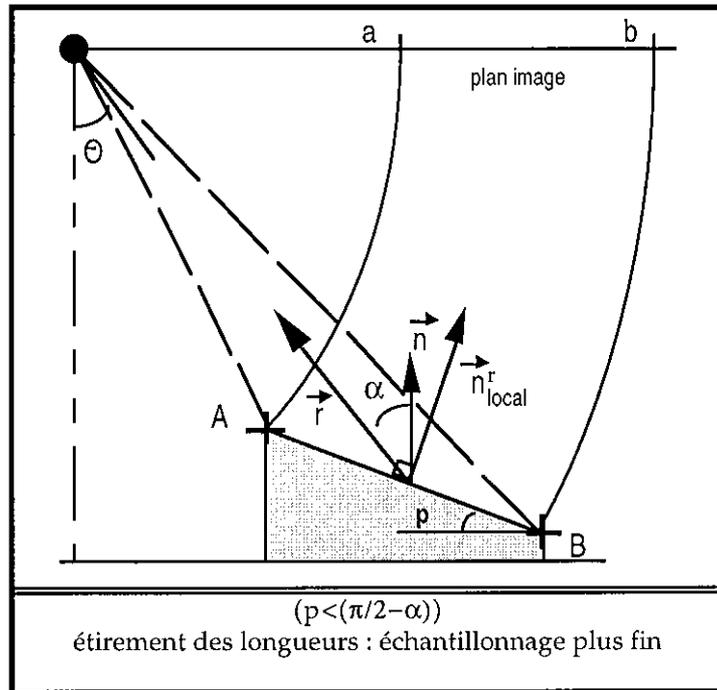


Figure 2.8- versant opposé au capteur : les Ubacs

sur des reliefs de hautes altitudes, ceux-ci semblent fuir et se décaler dans le sens de la visée. Or ici dans le cas de l'imagerie radar nous venons de voir que c'est l'inverse qui se produit, en fait le relief se trouve rapproché du point de visé (point nadir, sub-satellite), illustration sur la figure 2.6. Des vignettes d'images SAR, sur des régions de relief très accidenté, sont montrées dans un chapitre suivant (notamment au chapitre 7).

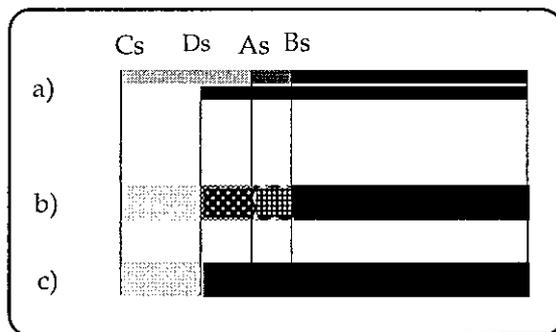
Nous avons gardé pour la fin le cas de la portion de terrain ombrée, facile à assimiler d'autant plus qu'il existe sur toute image de télédétection pour laquelle l'éclairement est oblique (inclinaison des rayons du soleil pour l'imagerie optique) par rapport à la verticale du lieu imagé. Mais les ombres portées diffèrent ici également de ce que l'on a l'habitude d'observer sur une image issue d'un instrument optique passif à visée latérale. Suivant la configuration du terrain, l'étendue de l'ombre portée, projetée sur le plan image, va varier. Le début de l'ombre n'est plus ici déterminé par le point qui culmine. En effet nous venons de voir précédemment que l'ordonnement des points au sol (repérés sur un ellipsoïde de référence) pouvait être différent de celui rencontré sur le plan image. En effet, la distance radiale d'un point observé au capteur est à la fois fonction de sa position par rapport à la trace du satellite, et de son élévation (ces quantités étant repérées sur un ellipsoïde de référence). Certains échos seront dits en "retard" s'ils sont devancés par des échos provenant de points plus éloignés. Cet éloignement est mesuré sur un ellipsoïde de référence et correspond à la distance qui sépare le point considéré de la trace du satellite. Le retard ou l'avance des échos retournés, est directement lié à l'élévation des points. Aussi il peut arriver que certains échos dit "en retard" se superposent à d'autres. Dans le cas présenté, des échos se superposent au cône d'ombre. Cet artifice a pour effet de diminuer la portée de l'ombre sur le plan image. L'ombre d'une structure verticale est toujours raccourcie par le phénomène d'inversion, ce qui n'est plus le cas lorsque la structure est à pente plus douce. Nous avons déduit du cas d'imagerie précédent que l'inversion était favorisée par des valeurs de l'angle α petites et pour des valeurs de h grandes. Aussi plus la configuration de prise de vue est propice à l'inversion, plus les ombres portées auront des chances d'être diminuées (Fig. 2.9).

De même des échos en avance (dus à un enchaînement de plusieurs points culminants) pourraient avoir la même influence, c'est-à-dire une réduction de l'étendue du cône d'ombre produite toujours à cause d'une superposition d'échos, mais cette fois-ci sur la partie externe du cône d'ombre. Nous verrons d'ailleurs, dans un chapitre ultérieur, qu'il est important d'étudier un historique du signal afin de prévoir, surtout sur les bords de la zone d'intérêt, ces échos dont la distribution chronologique ne respecte pas la distribution spatiale sur le sol. Il ne faut pas oublier que cette distribution chronologique est très importante puisque c'est elle qui détermine la distribution spatiale sur le plan image.

Il est plus facile pour nous, d'apprécier les distances depuis un repère lié au sol, car il est difficile d'évaluer les distances dans un repère lié à l'instrument. Sur le plan image nous disposons d'une information qui, du point de vue spatial, n'est plus répartie de manière simple. La loi de distribution de l'information est assujettie à une grille irrégulière dont la taille de chaque maille (pixel) est liée à la fois à l'instrument et à la topographie du terrain. En terme d'échantillonnage, il semble difficile de définir un échantillonnage spatial nominal pour toute la scène. Il est important de noter que la vocation première du radar imageur à bord de ERS n'était pas destinée à la cartographie telle qu'elle est étudiée à partir des images optique. Avec des caractéristiques choisies (angle d'incidence, ...) l'imagerie radar peut être préférée à l'imagerie optique. Des capteurs imageurs radar aéroportés dont les caractéristiques instrumentales diffèrent, ont déjà montré l'intérêt que représente l'imagerie radar dans le domaine de la cartographie.

2.3.6 Modélisation de l'observable

Nous venons de voir que les distances telles qu'elles sont mesurées au sol ne sont pas respectées. Mais au delà de cette notion géométrique nous abordons un autre problème tout aussi important qui concerne l'échantillonnage du signal rétrodiffusé. En effet ces distorsions géométriques provoquent des distorsions radiométriques qui sont inévitables. Elles viennent d'ailleurs d'être introduites de manière implicite sur la figure 2.6. En effet nous avons parlé de la diminution du cône d'ombre due au déplacement de terrain sur le plan image. La diminution de l'ombre portée résulte du cumul d'échos provenant d'objets non adjacents et pourtant possédant la même distance radiale. Sur le plan radiométrique la conséquence de ce phénomène est grande (Fig. 2.9). Nous avons choisi de nommer aberration radiométrique l'incidence des aberrations géométriques sur la radiométrie.



- la zone ombrée est diminuée par la superposition des échos en retard, déplacement des ombres dans le sens de la visée,
- il en résulte un cumul des échos, et un raccourcissement du cône d'ombre par rapport à
- l'ombre telle qu'elle serait vue par un capteur imageur à visée latérale passif.

Figure 2.9- enregistrement du signal rétrodiffusé par un capteur actif à visée latérale (la situation décrite, est celle de la figure 2.5)

Les pixels sont non seulement désordonnés (déplacement de terrain), de tailles différentes (c'est-à-dire ne couvrant pas la même surface au sol), mais de plus peuvent se chevaucher. Ils ne représentent donc pas la même quantité d'information. Cette quantité d'information liée à l'amplitude du signal enregistrée est proportionnelle à la puissance rétrodiffusée. Plus le nombre d'éléments rétrodiffusants simultanément est grand et plus il y a des chances d'atteindre un état de saturation. En effet il ne faut pas oublier que cette information subit une quantification pour se présenter sous une forme numérique. Cette quantification impose des limites inférieure et supérieure, si bien que les réponses supérieures au seuil maximum (à cause du cumul des échos simultanés) seront tronquées et apparaîtront saturées sur l'image. Cette opération produit une perte irréversible de l'information. Il sera difficile par simple photo-interprétation d'identifier les zones de saturation et surtout d'en établir la cause. L'information thématique est associée à la couverture du sol (donc à l'ensemble des objets rétrodiffusants). La mise à jour de cette information est réalisée à partir de l'étude de la réponse des objets. La contribution de plusieurs objets pour une même mesure entraîne des défauts que l'on ne sait pas encore maîtriser.

De fortes préoccupations sur ce sujet nous ont amené à travailler une nouvelle méthode d'échantillonnage pour pallier aux problèmes liés à la distribution de l'information sur une grille très irrégulière.

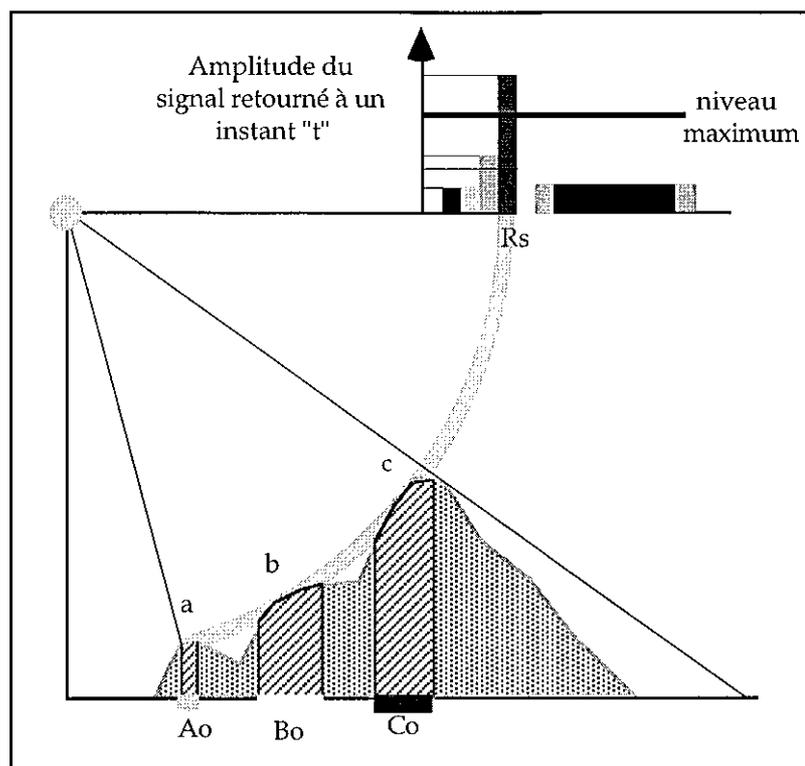


Figure 2.10 - cumul des échos simultanés d'objets distincts (non juxtaposés)

Lorsqu'il s'agira de modifier l'espace de représentation de l'image pour se replacer dans un référentiel terrestre, l'éclatement de la mesure R_s pour retrouver les mesures respectives issues de a , b , et c , posera un problème. Les contributions individuelles de l'ensemble a , b , et c , ne sont pas simples à modéliser, à moins de disposer d'une connaissance *a priori* fine de la surface imagée (orographie, couverture du sol, modélisation de la réponse des différents objets).

Sur la figure 2.10 est présentée schématiquement une rétrodiffusion simultanée triple. Même si les points $\{a, b, c\}$ sont distincts au sol (non attenants), comme ils appartiennent à la même porte radar (distance radiale identique), leurs échos seront simultanés et donc enregistrés dans une même cellule radar. Le fait que ces points sont disjoints est très important car il est d'autant plus rare que la surface terrestre soit de même nature que ces objets sont très éloignés. La mesure résultante R_s sera alors une combinaison des participations de a , b , et c . Ces cumuls sont d'autant plus fréquents que les régions étudiées sont très accidentées. Dans le cas testé (cf. Chap. 7), en zone de montagne (massif des Ecrins) plus de 50% de l'image est constitué de pixels dont la mesure résulte d'une cumulation de plusieurs échos. Le cumul de ces échos au sein d'une même cellule SAR augmente le risque d'atteindre un état de saturation et de perdre ainsi de l'information. Il est à noter ici que la qualité du résultat

va dépendre de la zone étudiée comme dans beaucoup d'études de télédétection spatiale d'ailleurs. La méthode d'interpolation joue un rôle primordial dans la manipulation d'une image, et la réussite de son application sera corrélée avec les cas de ré-échantillonnage traités.

Nous avons parcouru en détail des cas d'imagerie pour le moins particuliers, qu'on rencontre sur une image radar, et ce d'autant plus qu'on s'intéresse à une région au relief très accidenté. Pour les utilisateurs des images radar, il est parfois difficile d'extraire une information à partir de telles images, surtout si elles sont maintenues dans leur référentiel d'origine (référentiel instrument). Aussi il est souhaité pour certaines applications, de modifier l'espace de représentation de telles images et de les transférer dans un référentiel terrestre (ellipsoïde de référence). Cette opération nécessite de grandes précautions car le risque de dégrader la qualité des mesures est grand, puisque celle-ci ne peut avoir lieu sans procéder à un ré-échantillonnage de l'information.

2.3.7 Ré-échantillonnage à partir d'une grille irrégulière

L'écho enregistré par le capteur est échantillonné en temps ; pour chaque intervalle de temps τ constant une mesure σ_i est effectuée, τ correspond à l'unité de temps appliquée pour discrétiser le signal. Pendant cet intervalle de temps τ , la cellule radar intercepte une portion de sol dont la taille est très variable comme nous avons pu le voir précédemment. Si cet échantillonnage est régulier en temps, il devient par contre en terme de surface couverte au sol un échantillonnage très irrégulier.

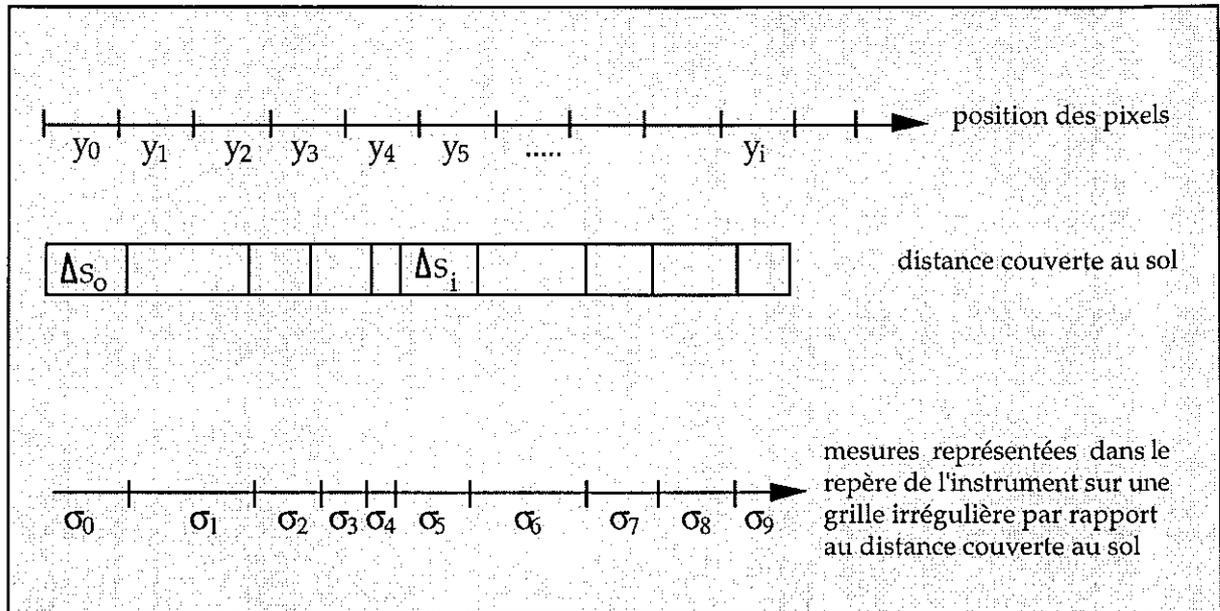


Schéma 2.1 - Echantillonnage dans le repère du satellite

Soit l'ensemble des mesures $\{\sigma_i\}$ réalisées aux instants $\{t_i\}$, avec $(t_k - t_{k-1}) = \tau$ (Eq. 2.5)

A chaque mesure σ_i est associé un ensemble de paramètres $\{y_i, \Delta s_i\}$,

où: y_i représente la position du pixel i , sur l'image,

Δs_i représente la surface de ce pixel, dans le référentiel instrument.

Lorsque l'on travaille dans le référentiel de l'instrument, on doit tenir compte de la disparité en taille de chaque élément et gérer l'information contenue dans l'ensemble des mesures $\{\sigma_i\}$. Si l'on veut déformer la grille de représentation du référentiel lié à l'instrument, il faut apprendre à modéliser la répartition des mesures $\{\sigma_i\}$ qui constituent les mesures originales effectuées par le capteur. Une redistribution de cet ensemble de mesures sur une nouvelle grille pourra alors être envisagée. Autrement dit, si le désir exprimé est de travailler sur une grille régulière (en terme de surface couverte au sol), il faut procéder à un ré-échantillonnage de l'information.

Les méthodes actuelles employées pour le ré-échantillonnage des images de télédétection font appel aux procédures classiques d'interpolation : plus proche voisin, bi-cubique, et récemment la transformée en ondelette s'est avérée un outil très adapté. Il n'est pas facile de trouver une loi adéquate pour redistribuer l'information qui se présente sous forme numérique et donc par conséquent discontinue. Ce n'est pas seulement la taille caractéristique de chaque maille (pixel), qui pose un

problème car ce genre d'aberration géométrique avait déjà été rencontré en imagerie optique en visée latérale. Mais ce sont les artefacts nouveaux dus surtout aux inversions de relief et au cumul de l'information de plusieurs objets (adjacents ou pas) qui posent des problèmes. Nous avons voulu proposer une nouvelle loi pour répartir l'information. Celle-ci est basée sur la détermination de coefficients de proportionnalité déduits d'une analyse topographique du sol étudié. Ce qui implique la prise en compte de l'orographie et du thème. Ces solutions pour la procédure de ré-échantillonnage ont fait l'objet de tests et seront explicitées dans le chapitre 5.

La mesure enregistrée par le capteur est un coefficient de rétrodiffusion sensible à la fois aux propriétés extrinsèques et intrinsèques des objets. Ces influences se traduisent au sein de l'image par des aberrations radiométriques et géométriques. Outre les causes énumérées jusqu'à présent, il faut également ne pas omettre de parler du speckle qui reste un problème dans l'exploitation des images radar, et en particulier pour le ré-échantillonnage.

2.3.8 Le speckle

La quantité d'information peut être trop riche en ce sens qu'elle rend difficile l'interprétation d'une scène par la présence de trop de détails. Les images radar présentent un aspect "poivre et sel", dû à la présence d'un effet dû à la dimension de la longueur d'onde vis-à-vis de la résolution spatiale de l'instrument. La longueur d'onde λ du signal fixe la taille des objets diffusants à considérer au sol. Comme λ est très petite par rapport à la résolution spatiale du capteur, les objets dont la taille est inférieure à celle de la surface élémentaire observée, participent à la mesure, leur contribution propre est la cause du bruit multiplicatif : le chatoiement, remarqué sur les images radar. Ainsi la mesure σ décrite précédemment résulte de l'ensemble des réponses des micro-réflecteurs qui composent l'élément de surface. Comme il s'agit d'une somme cohérente, la somme des coefficients de rétrodiffusion associés à chaque micro-réflecteur fera qu'une surface lisse pourra être perçue comme rugueuse.

L'influence relative du speckle est plus prononcée sur les petites échelles (Cauneau et Ranchin, 1993). Aussi l'étude de sa répartition sur l'image pourrait être un moyen de décrire la variabilité à petite échelle ; dès lors il ne serait plus considéré comme un bruit, mais comme une information. Il y a généralement un compromis entre : la volonté d'homogénéiser des éléments classés dans un même groupe et la volonté de prendre en compte la variabilité spatiale de l'information sur l'image, en fonction des différentes échelles.

Cependant nombreux sont les utilisateurs des images radar à préférer une image brute. Les moyens actuels pour éliminer le speckle agissent parfois de façon très brutale en filtrant une partie non négligeable de l'information, aussi les photo-interprètes sont demandeurs d'images non filtrées. Ils préfèrent porter leur regard sur des mesures brutes, leurs yeux faisant office de filtre naturel. L'interprétation de telles images est très délicate, en effet il est difficile de trouver une surface homogène. Il faut apprendre à qualifier un objet non plus que par sa forme, mais aussi, par des caractéristiques de structures globales et son environnement, ce qui change des méthodes préconisées pour l'interprétation des images optique.

2.3.9 La fonction f'

Nous venons de décrire progressivement les éléments nécessaires pour construire les fonctions f et g . La composition de ces fonctions permet de simuler l'acquisition d'une image SAR. L'avantage d'un tel simulateur est multiple, dans le cadre de notre travail celui-ci sera mis à profit pour construire une image synthétique radar. L'utilisation de cette image synthétique impose des critères de qualité qui servent de spécifications pour construire le simulateur de prise de vue radar. Celles-ci reposent à la fois sur les qualités du simulateur mais aussi sur les qualités de la base de renseignements du terrain observé. Pour l'instant nous n'évoquerons que les qualités liées au simulateur, nous verrons les autres ultérieurement. En ce qui nous concerne, nous serons très attachés à la qualité géométrique de cette image synthétique. La précision géométrique (en terme de localisation) de l'image synthétique obtenue de la simulation d'une image radar est fortement liée à la connaissance des paramètres géométrique de prise de vue nominaux.

Lorsqu'on intègre l'ensemble des paramètres instrument pour simuler une prise de vue du SAR de ERS-1, on est agréablement surpris de la précision obtenue sur la géo-localisation. Cependant il réside toujours un léger décalage entre l'image brute et cette image simulée. Ce décalage est généralement résorbé par l'application d'un modèle de déformation polynomial d'ordre un. Cet écart bien connu des utilisateurs des images ERS est attribué à l'erreur commise sur la détermination des valeurs suivantes : le zéro Doppler et l'horloge (stop start). Ce modèle de déformation constitue la fonction f' .

Le fonctionnement du capteur est totalement décrit par la composition des fonctions f , g , et f' . Nous aborderons dans les trois derniers chapitres la description détaillée du simulateur radar que nous avons construit afin de disposer d'une image radar synthétique.

2.3.10 Conclusion

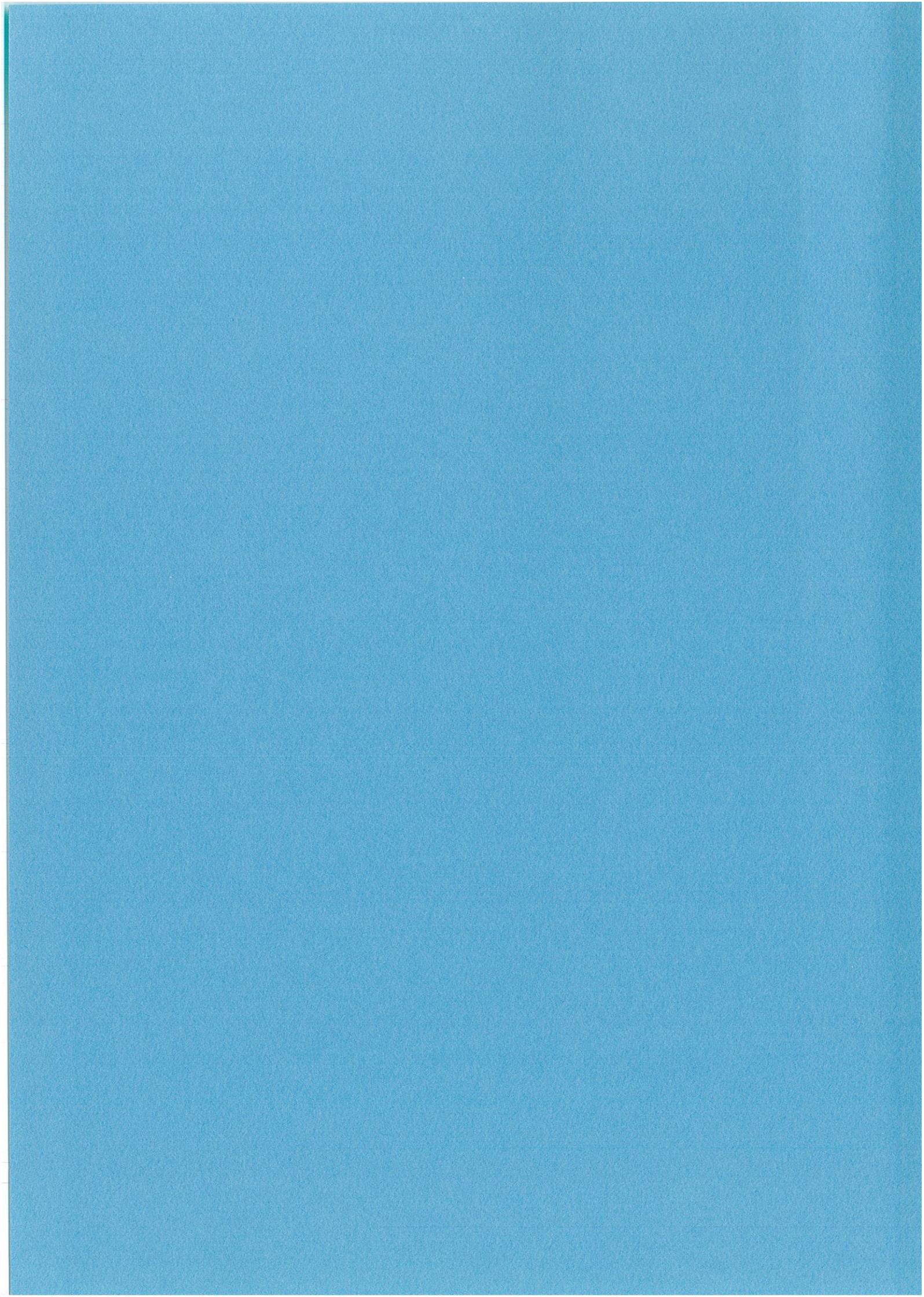
Les images radar, quoique ne bénéficiant pas d'une longue expérience d'exploitation et d'analyse, constituent un avantage certain voire unique, quant à l'information que l'on peut en tirer notamment sur des zones particulières, inaccessibles avec des moyens optique traditionnels. Le premier stade qui consiste à développer des outils pour mieux apprécier la qualité et la quantité d'information à attendre de tels types d'images est encore en plein essor.

La description de l'instrument, de son mode de fonctionnement, et de la mesure qu'il réalise permettent de cerner ce que l'on peut attendre des images mises à notre disposition. Les caractères propres de ces images associés aux applications souhaitées, définissent des étapes de traitement spécifiques.

2.4 CONCLUSION

Le développement des satellites et les performances des capteurs embarqués permettent aujourd'hui de se doter de moyens d'information opérationnels et adaptés aux utilisations auxquelles ils sont destinés. Les images radar constituent un élément essentiel dans la constitution d'une base de données. Car les informations qu'il est possible d'en extraire sont souvent complémentaires de celles issues des images optique et que l'on utilise quotidiennement.

Très vite il est apparu intéressant d'élaborer des collaborations multicapteur afin d'arriver plus vite aux résultats ou si ce n'est de réaliser des traitements plus performants en jouissant du fruit des travaux antérieurs effectués sur d'autres types d'instruments. L'enjeu est donc considérable, et nous en venons à discuter d'un point très important à savoir comment utiliser les connaissances acquises dans des traitements analogues, ou comment impliquer directement une information externe dans le traitement particulier de ces images radar. Cette information externe peut provenir d'une autre source où elle est plus facilement accessible afin d'améliorer les conditions de traitement. C'est à dessein d'utiliser des modalités différentes suivant leurs propres compétences qu'a été pensé ce travail. Le développement d'outils adaptés au traitement des images radar était certes nécessaire, mais c'est en cherchant à profiter soit des outils, soit des conclusions existant dans le monde de l'imagerie optique qu'il s'est effectué.



Chapitre 3

FUSION DE DONNEES MULTICAPTEUR

Les mesures engendrées par les capteurs satellitaires se présentent sous forme d'images appartenant chacune au référentiel du capteur qui lui a donné naissance. Les traitements mis en jeu pour les réunir font intervenir des notions diverses et variées, si bien que l'on est amené à aborder de multiples disciplines. Ces traitements trouvent leur justification dans l'historique de l'image, c'est-à-dire, dans tous les processus qui ont permis de les obtenir à compter du mouvement de la plateforme jusqu'à l'utilisation de ces données en passant bien sûr par les techniques de formation et de transmission des images. Pour mieux rendre compte des observations, il n'est pas rare d'avoir à leur associer des données annexes, exogènes, qui ne se présentent pas forcément sous la forme d'une image. Les traitements effectués utilisent des techniques de traitement d'image, indissociables des techniques du traitement de l'information.

Le but recherché par la fusion de capteurs vise à obtenir des connaissances de plus en plus approfondies par la mise en commun de données mixtes. L'enrichissement dépend de la synergie produite à partir de telles associations. Même si un grand nombre de problèmes se pose, les motivations pour réaliser l'analyse conjointe de données hétérogènes, restent fortes. La mise en commun peut être effectuée à des niveaux de traitements différents, aussi des méthodes diverses d'association ont été engendrées. Les succès des premières démarches entreprises ont suscité de nombreux intérêts. Si bien qu'aujourd'hui la fusion optique/radar dans le domaine de l'imagerie satellitaire est en plein épanouissement et touche de nombreux domaines d'application (Actes du colloque SPOT-ERS, 1993). Ce chapitre a pour but de décrire le type de fusion de données tel qu'il a été abordé dans cette thèse.

3.1 INTRODUCTION

La mise à disposition d'une série d'images sur la même scène reste un problème d'actualité. De nombreux facteurs en sont la cause ; le problème s'accroît lorsqu'on veut étudier la dynamique d'un phénomène dont l'échelle de temps impose un certain intervalle de temps entre les différentes prises de vue. Il est évident que plus le nombre de données hétérogènes est grand et plus la tâche,

pour les regrouper, se complexifie. Ces problèmes proviennent essentiellement des caractéristiques des instruments, de leur fréquence de passage au dessus d'un même lieu et de leur capacité à stocker et délivrer les données pendant la mission. La position géographique de l'observation intervient également, d'autant plus que certaines régions du globe restent encore mal couvertes. L'analyse préliminaire des caractères intrinsèques des données permet de justifier leur utilisation, et de sélectionner uniquement celles qui apporteront un gain significatif. Des résultats nouveaux, sinon des résultats de performances meilleures, sont espérés grâce à l'utilisation croisée des aspects "multispectral", "multirésolution" des données, et à la répétition des acquisitions grâce à des plates-formes indépendantes, ce que l'on pourrait nommer aspect "multidate" (Brien *et al.*, 1992). L'éventail des applications qui ont vu le jour est très large. Toutefois on peut les scinder en deux groupes : celles qui visent à exploiter le caractère redondant des informations et celles visant au contraire à exploiter le caractère complémentaire des informations. Nous avons eu la chance de pouvoir aborder au sein d'une application de fusion un problème faisant appel à des informations optique/radar contemporaines et non-contemporaines afin justement d'évaluer la synergie qui découle de la redondance et de la complémentarité de telles données. Et surtout répertorier les conditions requises pour mener à bien de telles études. Les problèmes soulevés sont multiples ; cette expérience enrichissante fait l'objet d'un chapitre à part entière.

Un des premiers buts recherchés dans un regroupement d'images optique/radar, est l'obtention d'une synergie qui sera d'autant plus grande que l'association est bien faite. Cette synergie peut être quantifiée grâce à la connaissance que l'on extrait de l'ensemble des données. L'ordonnement des données et l'analyse sémantique du résultat permet de définir le niveau de la fusion. L'accession à un niveau de connaissance plus élevé constitue une des motivations essentielles face aux multiples efforts à produire pour réaliser l'opération de fusion multicapteur (Pau, 1988).

3.2 FORMALISME

Dans le domaine de l'imagerie satellitaire, il s'agit bien souvent de rendre compte de l'état de surface et/ou de l'état d'activité, soit de la surface terrestre, soit des objets répartis sur cette surface. Cette analyse peut être menée soit de façon directe, soit de façon indirecte, par le biais d'un (ou plusieurs) paramètre(s) extrait(s) à partir des mesures. Il faut pouvoir à la fois qualifier cet état et extraire le (ou les) paramètre(s) qui le caractérise(nt) pour le "transcrire" lors de l'interprétation des données.

La caractérisation de l'application qu'on désire réaliser permet de cerner l'étendue du problème vis-à-vis du phénomène qu'on observe. Ce phénomène est-il atypique ; ou bien observable

par les différentes sources ? Doit-il être considéré comme statique ou dynamique ? En d'autres termes quelle est l'échelle de temps de son évolution ? De plus est-ce que les paramètres observables ne subissent pas de mutation pendant cette évolution ? Sont-ils toujours observables et par quelles sources ? Quel est l'intervalle de temps limite acceptable entre les différentes acquisitions ? Sachant qu'une acquisition simultanée est quasiment impossible avec les configurations orbitales actuelles ?

Mais aussi quelle est l'ampleur des quantités observables ? Autrement dit, quelles sont leurs variations spatiales et leurs amplitudes, quelle est l'échelle de représentation maximum pour les détecter ?

Peut-on utiliser des configurations de prises de vues variées à savoir : des acquisitions en phase ascendante ou descendante (comme ce sera le cas du capteur SAR) et des acquisitions en mode de visée latéral ou vertical (comme ce sera le cas du capteur HRV) ? Y a-t-il des conditions externes qui puissent intervenir sur la qualité des données ? Quels sont les facteurs polluants et leurs implications sur les données (comme par exemple l'atmosphère pour l'optique, ou parfois les variations de rugosité de surface avec le vent pour le radar) ?

Les réponses à toutes ces questions permettent non seulement de choisir les caractéristiques requises pour les données sources mais également de choisir une stratégie de fusion la mieux adaptée face aux problèmes à résoudre. Un grand nombre d'approches a été expérimenté ces dernières années, toutefois il est possible par le biais d'un schéma simplifié de représenter l'opération de fusion de manière générique. Le schéma utilisé par S. Houzelle a été retenu (Houzelle, 1993). Ce schéma présente l'avantage d'être simple et à même de formuler un grand nombre d'opérations de fusion (Fig. 3.1).

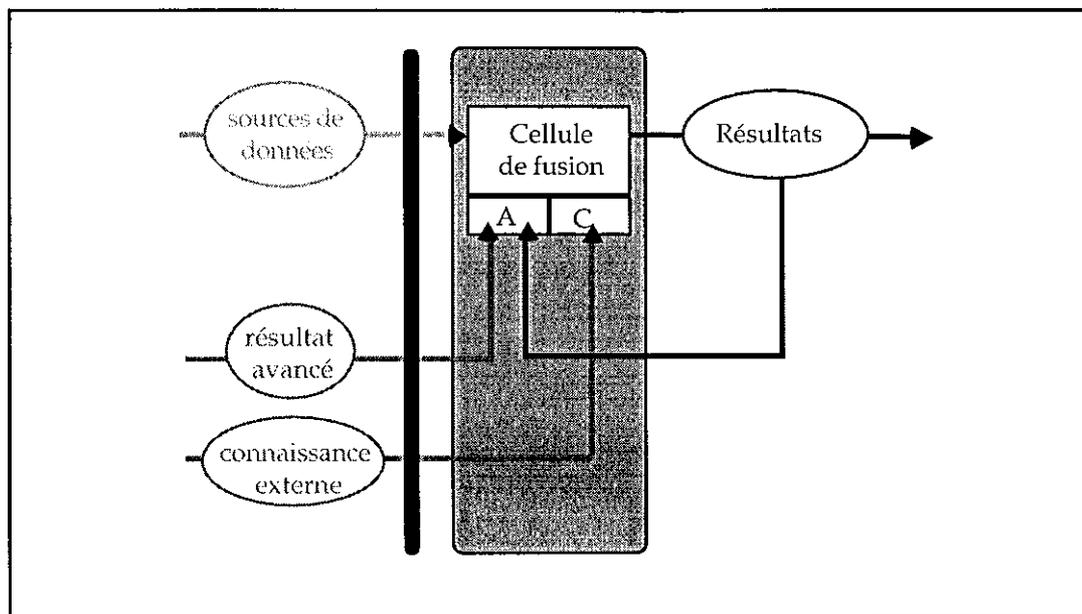


Figure -3.1- Description d'une opération de fusion

Ce schéma est constituée de divers éléments dont la définition est précisée à chaque étude réalisée. C'est au sein de la cellule de fusion, placée au centre, que la réunion des données va avoir lieu. Cette cellule est capable d'intégrer aussi bien des données provenant des images satellitaires que d'autres types de données faisant partie des connaissances externes. On peut aussi imaginer plusieurs cellules de fusions activées en série ou en parallèle, avec des échanges entre celles-ci, ou bien des processus récursifs au sein d'une même cellule. Si bien qu'une cellule de fusion peut être amenée à traiter des données résultant d'opérations de fusion antérieures.

La première préoccupation porte sur le conditionnement des informations que doit assimiler une cellule de fusion, et ce en fonction du résultat désiré. Puis se pose le problème de l'action de la cellule de fusion sur les données. L'application est prépondérante ; c'est elle qui donne des directives quant aux choix des données brutes nécessaires, mais aussi définit le temps dont on dispose pour la réalisation, et la précision minimale acceptable pour les résultats. Toutes ces contraintes déterminent le conditionnement des données brutes et le processus de fusion sans oublier un aspect important, la détermination de l'étape dans laquelle les données vont être associées si le processus de fusion en comporte plusieurs.

3.3 PROBLEMATIQUE

La réalisation de telles études soulève deux types de problèmes disjoints au niveau du conditionnement des données avant même leur association, et qui sont abordés suivant le processus de fusion que l'on applique. Une image est souvent décrite par ses qualités intrinsèques : qualité radiométrique et qualité géométrique. Certains traitements numériques modifient de façon irréversible l'une et/ou l'autre de ces qualités. L'application de ces traitements soulève parfois de véritables compromis, entre le souci de préserver la fiabilité des mesures (qualité radiométrique) et le souci de connaître leur distribution spatiale avec précision (qualité géométrique). Pour limiter leurs implications, les processus d'analyses doivent être adaptés aux sources des données. Les dommages causés par ces traitements doivent être contrôlés et quantifiés pour maîtriser l'apport informatif mis en jeu et garder un maximum de confiance dans les données suivant leur provenance. Si l'exploitation des caractères complémentaires des données semble très prometteur, il faut tout de même veiller à ce que cette collaboration ne soit pas entachée d'une trop grande erreur à cause d'une pollution venant de données peu fiables. Aussi le résultat de la fusion va dépendre de la confiance que l'on accorde aux données de départ et aux concessions que l'on est prêt à accepter vis-à-vis de leur qualités en fin de pré-traitements (Alianna *et al.*, 1989). Le filtrage du speckle constitue un exemple de pré-traitement appliqué sur les images radar.

L'espace de représentation des résultats doit lui aussi être discuté. En effet, suivant l'application il sera plus ou moins nécessaire de modifier l'espace de représentation propre à chaque type de données. A savoir physiquement, comment, ramener toutes les informations dans un référentiel, compatible à toutes les sources d'information que l'on désire intégrer. Ceci demande de définir un référentiel commun capable d'accueillir ces informations hétérogènes. Puis se pose enfin le problème de l'analyse, ou comment tisser un raisonnement tenant compte, simultanément ou non, de toutes les données. Les interprétations de données multisource rivalisent ou coopèrent parfois, de telle sorte que les solutions peuvent naître de véritables compromis. En résumé, il faut maintenant disséquer la cellule de fusion afin de trouver les réponses aux questions suivantes : comment, où, et quand réaliser la fusion ?

3.4 ESPACE ET BASE DE REPRESENTATION DU RESULTAT DE LA FUSION

Le fait que les images ne possèdent pas la même échelle de représentation, pose parfois un réel souci. La réalisation d'analyses de plus en plus fines sur le plan spatial s'accompagne de sérieux problèmes d'appariement de l'information issue de capteurs indépendants (Chavez *et al.*, 1986). Lorsqu'un rapprochement physique étroit des données est souhaité (cumul de l'information au niveau

pixelaire), la mise en correspondance des informations est requise. Même si le problème peut être résolu dans sa globalité, il peut être scindé en deux. Les préoccupations sont de deux sortes : d'une part les images n'appartiennent pas au même référentiel et d'autre part elles ne possèdent pas la même base de représentation. Le but étant de disposer de données co-géolocalisées, et qui plus est, coïncidentes.

La mise en correspondance des images dans un unique repère n'est pas une tâche facile. Ici l'accent est mis sur le fait que nos images devront être représentées dans un même repère et, de plus, être ramenées à la même résolution spatiale. Les informations optique/radar seront alors distribuées sur une grille identique, offrant ainsi une "image multispectrale". Cette image s'exprimera à la fois dans des canaux appartenant aux domaines de l'optique et des hyperfréquences. Un vecteur de mesure pourra ainsi être affecté à chaque pixel ce qui permettra de combiner par pixel des réponses spectrales mixtes. La finalité de la fusion au niveau du pixel vise non seulement à regrouper les informations de diverses origines dans un même espace, mais aussi à présenter les résultats sous la forme d'une nouvelle image composite. La base de représentation choisie est identique à celle qui a été choisie pour le conditionnement de l'ensemble des données.

Des images optique et radar co-géoréférencées sont requises dès qu'on s'intéresse à une analyse détaillée de chaque pixel de la scène, les caractères multispectral et multirate sont alors largement exploités. L'aspect complémentaire des données est prépondérant pour de nombreuses applications. Le pouvoir séparateur des différents objets est augmenté grâce à la multiplication des mesures. La suite des opérations réside dans l'application de processus d'analyse globale de scène tels que les outils d'analyse statistique de données (Toutin, 1994). Pour cela il est nécessaire que toutes les mesures soient ramenées à la même résolution.

Il existe une autre façon de présenter le résultat du processus de fusion au niveau du pixel ; c'est la construction d'une image mosaïque. La fusion est réalisée alors sur le plan spatial, l'accent est mis sur le caractère multirésolution des données. En effet l'image résultat se présente sous la forme de vignettes (extraites des images optique/radar) accolées (Perlant, 1992). Lorsqu'on se déplace sur cette image, il faut prendre des précautions car la mesure dépend de l'origine de la vignette, mais l'avantage est de disposer d'une couverture globale de la scène. Au niveau du choix de l'échelle de représentation, deux possibilités se présentent. L'aspect multirésolution peut être exploité de deux manières différentes. Soit les données sont ramenées à la même échelle. Dans ce cas, cette dernière ne constitue pas un élément essentiel, car l'échelle effective commune de représentation choisie s'avère être la plus grande. Soit on désire conserver les atouts apportés par une vision fine de l'espace de certaines vignettes. Dans ce cas, les incrustations d'images sont réalisées en conservant leur résolution d'origine, et une attention particulière est réservée aux

problèmes de changement d'échelle occasionnés sur les bords des parties attenantes (Ranchin, et Wald, 1995). En effet lorsqu'on va se déplacer dans l'image, l'échelle de représentation ne sera pas la même en toutes parties.

La nature physique des mesures optique et radar sont trop distinctes pour permettre un appariement radiométrique simple. Seul le passage par un paramètre commun pourrait résoudre ce problème. Dans bien des cas, le résultat de la fusion au niveau du pixel se présente sous la forme d'une cartographie originale de la région imagée. La disposition et la localisation spatiale des éléments qui constituent la scène, sont très importantes. La qualité géométrique est ici très prisée. Malheureusement, les opérations de mélange tiennent rarement compte de la nature physique des mesures, si bien que le résultat est définitif et donne très peu de possibilités d'enchaîner d'autres traitements. Mais il permet par contre de tirer des conclusions pertinentes dues au mélange original des données multispectrale, voire multidate. Un grand nombre d'opération de classification ont su largement exploiter ces aspects (voir par exemple Mangolini, 1994).

La mise en correspondance géométrique n'est réalisée que si le besoin est réellement exprimé car cette opération dégrade les qualités radiométriques de l'image et nécessite surtout du temps. La contrainte temps peut être un facteur important, dans le choix de la fusion au niveau du pixel. En effet il est moins contraignant sur le plan géométrique, de réaliser la fusion non plus au niveau du pixel, mais au niveau des caractéristiques de la scène, ou des objets qui la constituent. L'intérêt se porte alors sur la caractérisation d'un objet ou d'un ensemble d'objets par l'analyse des mesures. Pour cela, il est par contre nécessaire d'identifier de façon précise les objets auxquels on va s'intéresser, et de connaître la position respective de ces objets dans les repères de représentation de chacune des sources d'information pour ne pas les confondre. N'étant pas issues de la même source, les images n'appartiennent pas au même référentiel, il faut donc résoudre des problèmes de "navigation". Ces problèmes sont généralement beaucoup plus simples que ceux qui sont soulevés lors de la mise en correspondance stricte.

Les images sont traitées séparément. La première étape consiste à travailler sur les données originales pour extraire une information plus synthétique qui va servir d'entrée au processus de fusion. Cette information intermédiaire possède un niveau de connaissance plus élevé puisque les quantités manipulées ne sont plus les mesures directes effectuées par le capteur mais des paramètres déduits de ces mesures. Aussi ce type d'études nécessite au préalable de savoir exactement à quels objets on s'intéresse. La nature physique de la mesure est cette fois-ci très importante car elle va permettre de déduire des caractéristiques spécifiques appelés attributs. Les connaissances requises dépassent la photo-interprétation, car ici on ne se contente plus d'observer et de décrire les phénomènes, mais on essaye de paramétrer leur état ainsi que l'évolution de celui-ci (si on

s'intéresse au comportement spatial et temporel). En effet une mesure engendre le calcul de nombreuses quantités physiques sous-jacentes liées à la couverture et à l'activité du sol imagé. La qualité radiométrique est ici très importante (Hall *et al.*, 1991). On cherche à créer une bibliothèque de renseignements signalétiques pour chaque objet ou groupe d'objets. Par le biais de l'étude de leurs réponses spectrales, de leur disposition, et de leur répartition spatiale ou d'autres paramètres, ils sont inventoriés et répertoriés. L'étude de ces paramètres peut également comprendre l'évolution dans le temps de ceux-ci si l'on dispose de renseignements incrémentaux dans le temps. Ces études ne peuvent être réalisées que si l'on sait interpréter au travers des mesures, les processus physiques, chimiques, ou biologiques qui leurs ont donnés naissance. C'est pourquoi l'on fait souvent appel à des spécialistes issus de domaines variés, afin d'explicitier les lois de comportement (d'évolution) spécifiques aux objets observés.

La fusion de données se produit ici non plus au niveau du pixel mais au niveau des attributs extraits des mesures originales (Houzelle *et al.*, 1991). Comme les données originales n'appartiennent pas au même plan image, il sera rare de présenter les résultats sous la forme d'une image. Il ne s'agit plus ici d'obtenir une cartographie au niveau du pixel, puisque les données n'ont pas été ramenées dans la même base de représentation. La formulation du résultat revêt un aspect différent, et se présente plutôt sous la forme de courbes, de tableaux de résultats, ou encore sous forme d'une décision. Il faut toutefois veiller sur les renseignements qui sont déduits à partir des sources de données. Il est vrai que plus les sources d'information sont variées et plus la liste des caractéristiques risque d'être longue. Le cumul d'informations redondantes peut être un handicap, saturer le système d'analyse et l'empêcher d'atteindre la (les) conclusion(s). Cette remarque nous amène à discuter d'un point important : comment gérer les interactions entre les différentes sources d'information.

3.5 FUSION D'INFORMATION OPTIQUE/RADAR - COMPLEMENTARITE/REDONDANCE

La combinaison des informations peut se faire de façon plus ou moins intime. Nous avons cité l'exemple d'une image mosaïque obtenue par un procédé de fusion au niveau du pixel. La fusion est réalisée sur le plan géométrique certes mais pas vraiment sur le plan radiométrique, les données sont juxtaposées afin d'obtenir une couverture complète de la scène. Chaque mesure garde sa nature propre, tout en offrant une combinaison spatiale des vignettes. Une mise en garde est formulée quant à l'utilisation d'un tel produit limité par exemple à la photo-interprétation. Comme les mesures optique/radar sont complémentaires, la diversité des caractères spectraux et temporels des mesures est également utilisée pour réaliser des classifications plus fines. Dans ce cas, ces deux aspects peuvent être exploités ensemble ou séparément. Un grand nombre de produits résulte de l'utilisation des outils tels que l'analyse en composantes principales (ACP) ou bien plus simplement, en modifiant

la base de représentation : représentation rouge, vert, bleu (RVB), ou encore intensité, teinte, saturation (IHS en anglais) (Harris *et al.*, 1990). Des modifications ont dû être apportés sur ces outils afin d'intégrer les composantes radar et optique de façon adéquate (par exemple Mangolini, 1994). Cependant même si le rapprochement des mesures optique/radar est très étroit, il n'est pas contrôlé, en ce sens que la nature physique du résultat échappe totalement à l'utilisateur. De ce fait il est difficile d'imaginer une suite à cette opération de fusion, et le résultat est souvent définitif. Le problème soulevé ici explique l'intérêt porté à l'exploitation des caractères redondants des données.

En effet l'étude de caractères redondants autorise la comparaison et la maîtrise de l'apport de chaque donnée. Cette approche se développe souvent sous forme d'une analyse multicateur particulière : c'est-à-dire la prise en compte de données non-contemporaines. L'avantage porte alors sur la possibilité d'extraire à partir des différents types de mesure un paramètre commun. Le suivi de l'évolution de phénomènes est alors assuré avec une meilleure fréquence de mesures du fait de leur origine (capteurs embarqués sur des plates-formes indépendantes). Il ne s'agit plus ici de présenter les résultats sous forme d'une cartographie, car il est rare de trouver un paramètre commun représentatif pour tous les objets appartenant à la scène étudiée. De ce fait, on ne s'intéresse plus dans ce cas, à l'étude globale de la scène, mais plutôt à une étude ciblée sur des éléments particuliers de celle-ci. Ce qui nécessite au préalable de connaître l'objet (ou le groupe d'objet) auquel on va s'intéresser pour choisir un paramètre juste, qui le caractérise. Les résultats sporadiques permettent de constituer un relevé de mesure homogène, mis à jour et intègre grâce à l'évaluation d'une quantité de même nature (par exemple un indice de végétation calculé à la fois à partir de mesure optique et radar).

Cependant l'aspect contemporain apporte lui aussi un élément supplémentaire dans l'étude de caractères redondants. Il est parfois intéressant de pouvoir choisir parmi un ensemble de mesures, les données les plus performantes. Il faut non seulement trouver des quantités comparables, mais également développer des outils capables de mener la comparaison, pour un instant donné. Des procédures font appel à des processus de fusion souvent très évolués relevant de modèles numériques ou de systèmes experts (Lefèvre et Phillip, 1994).

Les exemples que nous venons de citer illustrent la mise en valeur de la redondance spectrale des mesures et donc de leur quantités dérivées. Toutefois il ne faut pas omettre de parler de l'analyse des redondances de structures. Nous faisons référence ici aux travaux menés par Mangolini, Ranchin et Wald sur le développement d'un processus de fusion actuellement limité à l'analyse d'images optique/optique. Il s'agit du processus : ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures). L'analyse des informations contenues dans une image peut se scinder en deux, d'une part l'analyse de l'information spatiale et d'autre part l'analyse de l'information spectrale.

On exploite la redondance de ces deux types d'information. Celle de meilleure résolution spatiale, est utilisée pour établir un modèle (par analyse des redondances de structures) de l'évolution de l'information au travers des échelles. Plus exactement, on cherche à formaliser une loi de comportement des réponses spectrales suivant les échelles. Ainsi par application de cette loi on cherche à accroître la résolution spatiale de l'autre type d'information : l'information spectrale.

3.6 PROCESSUS DE FUSION - INFERENCE/INCORPORATION

Il est utile de cerner ces problèmes liés à l'association des données d'origines variés, au travers de quelques exemples d'application. Outre l'exploitation des caractères redondant ou complémentaire des données, la relation qui gère l'interaction des données au sein de la cellule de fusion est primordiale. La combinaison des données peut être réalisée par assistance de certaines données vis-à-vis des autres et/ou par confrontation des données.

Dans le premier cas, tout au long de la procédure de fusion, les différentes sources d'informations gardent le souvenir de leur origine et ne se mélangent pas de façon homogène. Les données (ou les paramètres qui en auront été extraits), qui ont permis d'atteindre le résultat sont toujours discernables. La relation instaurée entre les données, est une relation d'inférence (ou d'alliance), c'est-à-dire qu'il n'y a pas de couplage physique entre les différentes sources d'information. Certaines données ayant fait déjà leur preuve sont perçues comme des guides capables, de diriger le processus d'analyse et parfois même, si la relation est forte, d'asservir le reste des données. Elles supervisent le bon déroulement des opérations. Quant aux données ancillaires, bien que leur présence reste importante, elles subissent les traitements en aveugle. Cependant à divers stades du processus la perception du statut des différents types de données peut être modifié. Si la qualité d'une information est jugée crédible, alors elle peut à l'issue de tests de conformité prendre une position forte dans la suite du déroulement des informations. L'évolution de la qualité d'une information n'est pas toujours facile à quantifier, et le critère de choix pour réaliser la sélection est souvent un problème. Le critère doit être adapté aux types de données et au choix qui est effectué. Les données s'intercroisent, s'échangent mais ne se mélangent pas. Toutefois pour la représentation finale visuelle, des techniques de représentation procèdent parfois à un appariement superficiel des données (Peddle *et al.*, 1992).

On a vu précédemment des exemples de processus de fusion visant à exploiter les caractères redondant ou complémentaire des données. Le processus mis en oeuvre pour ARSIS constitue un bel exemple de l'exploitation de caractères redondants par l'application d'une loi d'inférence. Quant à l'exploitation de caractères complémentaires suivant une loi d'inférence, elle existe et sera discutée

dans le chapitre 6. Pour mention disons simplement qu'on utilise l'apport de l'information thématique optique pour faciliter la recherche de points d'appuis entre une image radar synthétique issue d'un modèle numérique de terrain (MNT) et une image radar brute.

Dans le deuxième cas, il ne s'agit plus dans ce cas de rechercher un moyen de rassembler les données en les juxtaposant mais au contraire de fondre les informations déduites de celles-ci au sein de la cellule de fusion. Cette procédure consiste à confronter les différents types de données. Une information nouvelle est élaborée de sorte que le résultat final ne peut laisser présumer les données sources qui lui ont donné naissance. L'interaction des données est alors très forte et parfois même difficile à gérer. Le mélange est beaucoup plus étroit en ce sens que les données interagissent physiquement. La fusion est homogène si le résultat ne laisse pas transparaître *a priori* la nature de la mesure originale dont il est issu. *A priori*, car cette origine peut apparaître lors de la quantification de l'erreur sur un calcul subsidiaire de paramètres. L'erreur commise peut être liée à la provenance de la donnée mère ou au mode de calcul qui peut être lui aussi, lié à la provenance de la donnée.

Afin d'illustrer notre propos, nous pouvons ici faire référence à des travaux de fusion utilisant une loi d'incorporation plus ou moins contraignante pour combiner les données. Les outils d'analyses statistique tel que l'ACP sont un bel exemple de forte incorporation du caractère multispectral des données (Mangolini, 1994). Quant à l'exploitation du caractère redondant des données suivant une loi d'incorporation, un exemple bien choisi me paraît être l'étude de fusion d'attributs qui sera discutée au chapitre 4. Il s'agit de suivre la croissance d'une variété végétale par assimilation de données optique/radar non contemporaines, dans un modèle numérique de croissance. Le résultat : la courbe de croissance du végétal est issu de l'intégration de mesures optique/radar échelonnées sur toute la période de croissance.

Cependant l'établissement de liens étroits entre les mesures faites par les différents capteurs, pose des problèmes au niveau de la nature physique des grandeurs qui sont manipulées. On est souvent amené à utiliser des méthodes de calculs empiriques pour satisfaire à la condition d'homogénéité, et rendre ainsi possible la comparaison, voire la confrontation (Appriou, 1993). Si le lien existant entre les données est trop fort, le processus de fusion peut se retrouver asservi par ces données. Ce lien constitue alors une faiblesse du processus. Le manque d'une seule donnée ou le défaut qu'elle peut produire (qualité) provoque parfois l'impossibilité d'atteindre le résultat. Aussi ce problème d'interdépendance des données a incité le développement de différentes procédures d'association. Ces procédures ont été qualifiées d'architecture car elles structurent l'association des données.

3.7 PROTOCOLE DE MELANGE - ARCHITECTURE DE FUSION

La gestion de l'entrecroisement des données est une étape importante qui ne peut être négligée. Des travaux ont été consacrés à la description de différentes architectures de fusion (Clément *et al.*, 1992a). Il est possible d'envisager des configurations diverses pour la réunion des données. L'architecture de fusion permet de structurer l'espace dans lequel les données sont fusionnées mais demande d'élaborer une stratégie particulière. Cette stratégie est d'autant plus complexe que nous avons affaire à une structure possédant plusieurs cellules de fusion. Nous avons vu qu'une cellule de fusion est à même d'intégrer des informations provenant elles-mêmes de premières opérations de fusion. On peut donc imaginer un ensemble de cellules de fusion regroupées au sein d'un même scénario. Cette stratégie décrit alors des règles de comportements entre les différentes cellules de fusion. Elle détermine le moment propice à l'association voire à la confrontation des données. Elle gère la communication entre les ensembles qui constituent l'architecture. Différents types d'architecture ont été "implémentés" : architecture centralisée, architecture décentralisée, architecture mixte. L'étude de ces trois types d'architecture a été faite par Mangolini (1994), par le biais d'une opération de classification effectuée sur des images satellitaires multicapteur. Il décrit la mise en oeuvre de telles architectures et conclut sur la qualité des résultats suivant la procédure suivie. Il semble difficile de connaître à l'avance la meilleure stratégie, le choix est fait en fonction de l'application à réaliser. Le résultat de l'opération de fusion ne représente plus dans tous les cas le but final de l'étude, mais présente une étape intermédiaire pour organiser les informations, et les préparer à une suite de traitements encore plus achevés. Dans ces cas, l'apport des processus de fusion est considérable si l'on sait leur prodiguer une suite. Cet apport est alors apprécié grâce à l'estimation du niveau de connaissance atteint.

Nous aborderons dans la chapitre suivant un cas de fusion d'attributs appliqué dans le domaine de l'agriculture. La synergie des données permet de suivre la croissance de végétaux, l'exemple donné concerne la betterave sucrière. Mais bien au delà du comportement végétal, des enjeux économiques tels que l'estimation de la date des récoltes, du rendement, sont bien évidemment sous-jacents. On pénètre alors dans le monde économique où il est important de suivre le marché et de contrôler les taux d'échanges (Ricciello, 1993 ; Polsky, 1994). Certes le chemin parcouru entre le suivi du comportement végétal et l'estimation du taux d'échange est long et implique de nombreux spécialistes, mais de tels résultats ne peuvent aboutir sans la considération de multiples données.

3.8 NIVEAU SEMANTIQUE

Concédant que la synergie des images optique et radar pouvait être exploitée à des niveaux différents, il s'est avéré utile de trier les différents processus couramment utilisés aujourd'hui. Aussi des scénarii ont été baptisés processus de fusion de bas niveau et d'autres processus de fusion de haut niveau. Ces derniers sollicitent plus en profondeur les informations issues du traitement conjoint des images multicateur.

Le couplage physique entre les données est plus ou moins étroit. Grâce au respect de la nature physique de la mesure, il est possible de considérer une suite à l'opération de fusion (Mangolini *et al.*, 1995). Des systèmes riches en stratégie ne se limitent pas à l'exploitation d'un seul avantage parmi les caractères suivants : multispectral, multirésolution, ou multirate. Mais font parfois appel à une base de données hétérogène et mènent des raisonnements croisés, en jouant à la fois avec les réponses spectrales des objets, les dates d'acquisition et la résolution des images. Sans compter les informations externes qu'ils sont aptes à intégrer suivant l'étude choisie (Clément *et al.*, 1992b). L'assimilation de ces données variées, dans la structure d'accueil, peut se faire de plus, de façon simultanée ou non. L'instant choisi pour l'intégration d'une information est guidé par la mise à disposition des données, et par la stratégie mise en oeuvre. La réaction d'un élément de l'architecture (cellule de fusion), face à une donnée manquante ou entachée d'une grossière erreur doit être envisagée pour ne pas pénaliser le résultat. La multitude des mesures prises en compte, et la complexité des processus d'analyse de celles-ci rendent difficile l'estimation de la qualité du résultat issu d'une opération de fusion. Et pourtant la qualité d'un résultat ne saurait être appréciée sans la connaissance de l'erreur qu'il apporte, d'autant plus que celui-ci peut conduire à la prise de décisions importantes.

L'erreur apportée par la mesure originale doit être ajoutée à l'erreur commise au sein de la cellule de fusion soit au niveau des calculs (approximations), soit au niveau des sélections du meilleur résultat issu de ces calculs. Il est recommandé de suivre avec précision l'expression de l'erreur après chaque traitement. Car il est rare de ne pas avoir affaire à une chaîne de traitements qui modifie séparément ou globalement les qualités intrinsèques d'une image. Il est à noter que la qualité du résultat final sera tributaire de la qualité des maillons qui produisent les erreurs les plus grandes. Lorsque le taux d'erreur résultant sera trop important il sera alors facile de retravailler sur les points faibles de la chaîne de traitements.

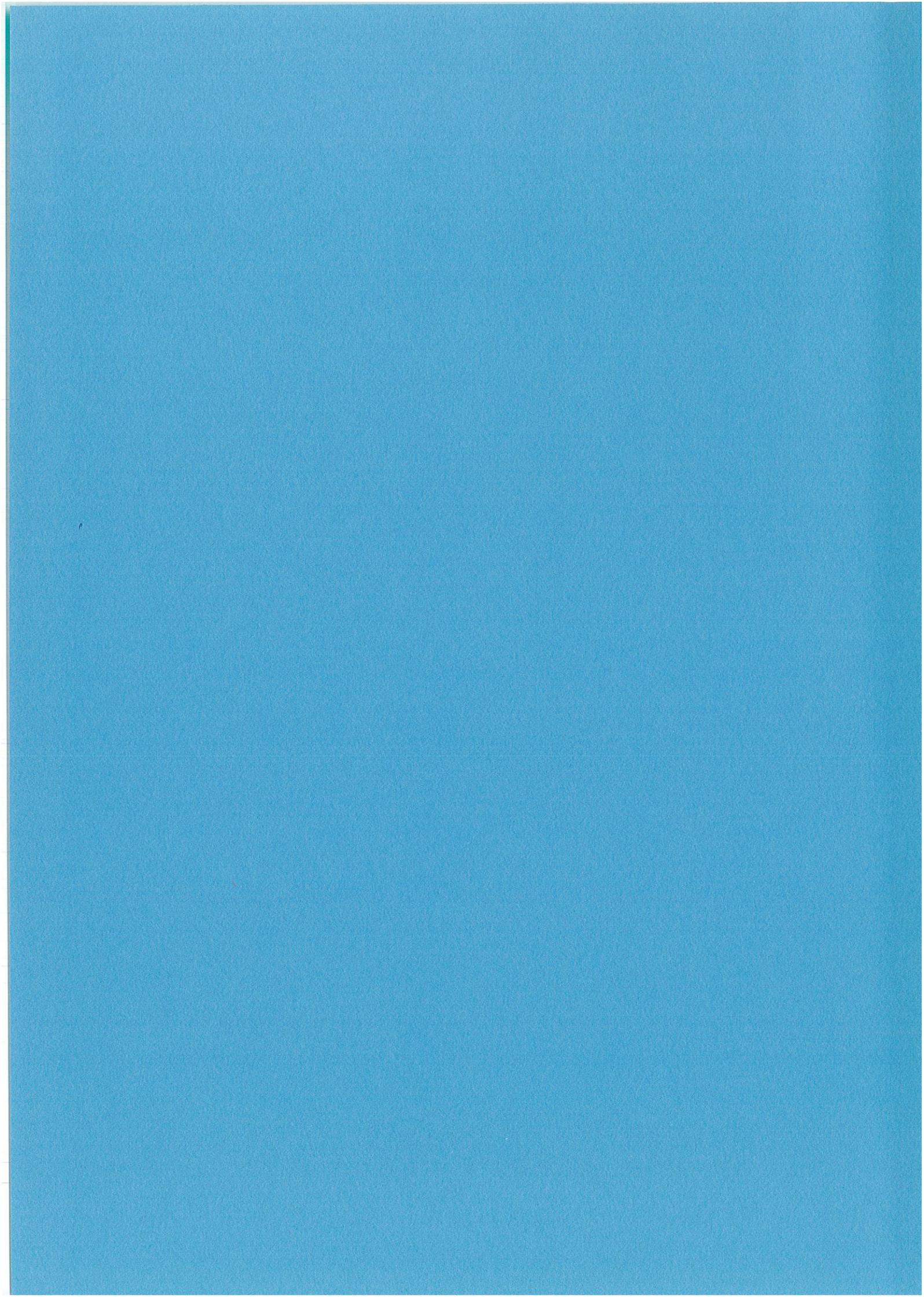
La mise en oeuvre de modèles numériques capables d'appréhender tant des mesures optique que des mesures radar a permis d'obtenir des résultats de grande qualité. Il n'est plus indispensable de disposer d'information co-géolocalisée. En effet, la superposition spatiale des données qui

constitue encore un problème conséquent (surtout sur des zones d'étude où le relief est très accidenté) débouche sur des processus de fusion encore limités. Le résultat prend souvent la forme d'une cartographie originale de la région étudiée. Mais le manque d'explicitation physique du mélange des mesures ne permet pas de pousser plus loin les analyses. Les opérations de fusion menées à partir de données co-géolocalisées sont souvent une terminaison de l'étude. Par contre l'élaboration de processus qui respectent la nature physique des mesures permet des post-traitements et par là même une action beaucoup plus étendue. Le niveau sémantique des connaissances mises à jour se trouve dès lors, rapidement élevé.

3.9 CONCLUSION

Le produit résultant d'une opération de fusion est souvent dédié à une application spécifique. Grâce aux compétences et à l'expérience des utilisateurs (photo-interprètes, thématiciens) un regard critique est porté sur les résultats. La mise en valeur et la reconnaissance de la synergie qui découle d'un processus de fusion, seront évaluées et appréciées à juste titre, par ces utilisateurs.

Plus le nombre de données augmente, plus leur nature se différencie, et plus les tâches pour les traiter conjointement se complexifient. Mais les connaissances qu'il est possible d'extraire de tels regroupements font que l'expérience en vaut la peine. La fusion de données dans le domaine de la télédétection spatiale existe depuis fort longtemps, aussi dans le cas de la fusion d'image optique/radar, il s'agit de reprendre un grand nombre de processus existant déjà et de les adapter si possible. Les modifications sont parfois conséquentes et méritent qu'on s'y attarde comme pour le développement d'une nouvelle expertise. L'association originale des capteurs imageurs optique/radar et la synergie qui en découle sont très prometteuses.



Chapitre 4

EXEMPLE DE FUSION D'ATTRIBUTS

L'ensemble des opérations de fusion a été partagé en trois sous-ensembles appelés : fusion de décision, fusion d'attributs, fusion de pixel. Chacun de ces procédés implique des traitements spéciaux sur les données. Sachant que chaque traitement laisse bien souvent des traces irréversibles, jouant à la fois sur la qualité et la quantité d'information recelées dans une image, il ne peut être appliqué gratuitement sans justification.

Les applications utilisatrices des images de télédétection demandent de plus en plus de traitements sophistiqués. Le niveau de traitement va de pair avec le niveau sémantique atteint lors de l'exploitation de l'information qui en est extraite. Suivant le cadre dans lequel on se place et surtout suivant la complexité des traitements que subissent les données, la fusion s'opère à un instant choisi sur des quantités spécifiques. De nos jours, des modèles numériques aptes à assimiler des données variées sont fréquemment utilisés. Dès lors la fusion est réalisée en leur sein et le résultat dépasse la simple réunion des données originales. Ces modèles ne se limitent plus à l'analyse des mesures, mais sont capables, à partir de l'extraction de paramètres dérivés, de pousser très loin les réflexions, et proposent des interprétations déjà très affinées.

La fusion d'attributs a été abordée par le biais d'une application intéressante sur plusieurs points. Outre le contexte (j'ai effectué cette étude en trois mois dans un groupe de recherche étranger) et le fait que l'application touchait le domaine de l'agriculture, la synergie des données optique/radar a été étudiée au travers d'un modèle numérique de croissance végétale. Un tel modèle fait appel à un certain nombre de notions et implique la collaboration de plusieurs spécialistes : tant des modélistes que des agronomes, voire des personnes de terrain qui visitent régulièrement les plantations concernées.

La démarche consiste à se doter d'un ensemble de connaissances afin de caractériser l'état biologique d'un végétal et mieux de suivre l'évolution de cet état au cours du temps par l'intégration

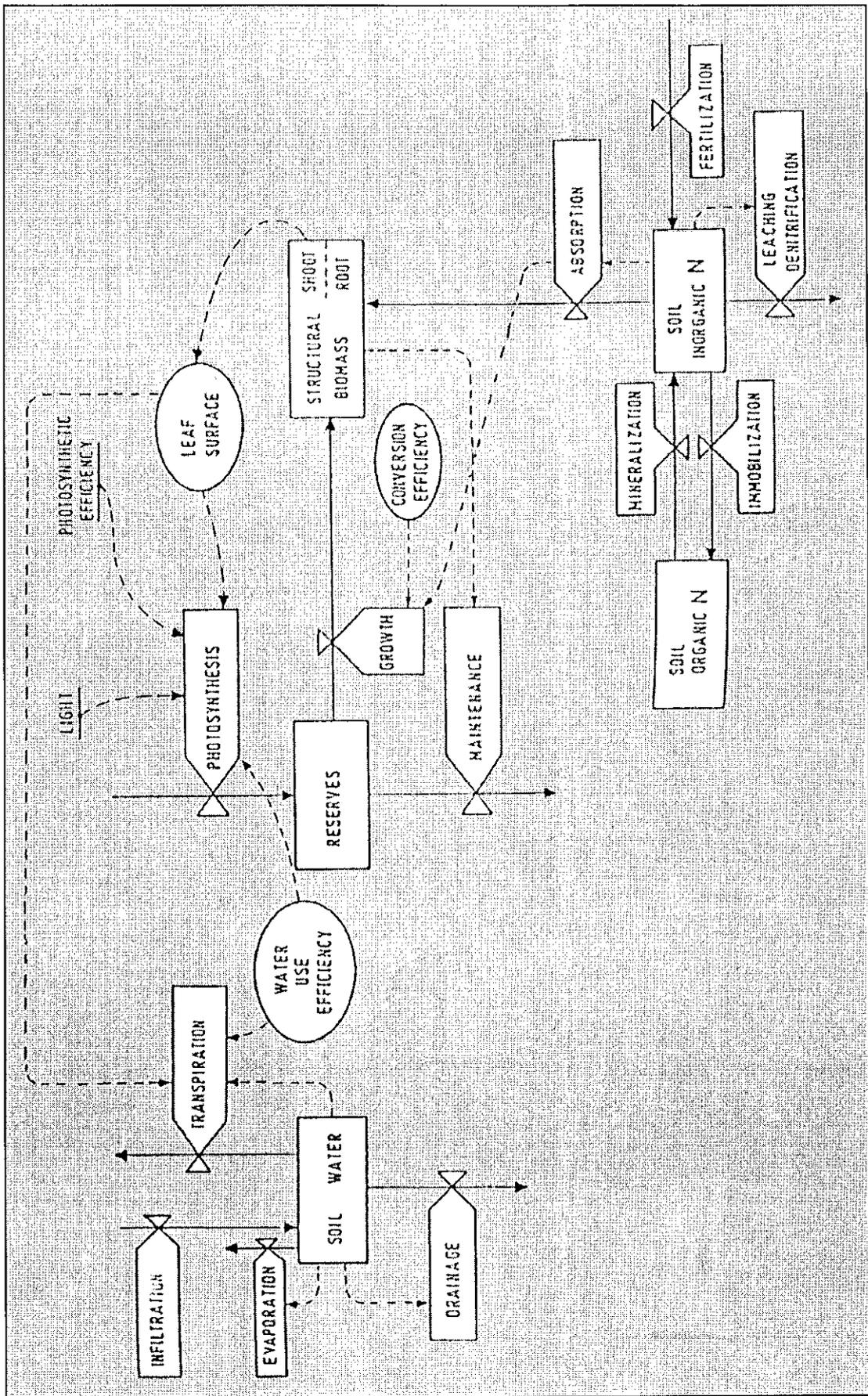


Figure 4.1 - Modèle de croissance végétale général

de données échelonnées sur toute la période de croissance. La figure 4.1 décrit le schéma général d'un modèle numérique de croissance végétale (Van Leeuwen, 1995).

Ce modèle formalise la croissance d'une espèce végétale par le biais de relations biologiques qui décrivent le comportement du végétal. La loi de comportement est ajustée en fonction de paramètres clés et de leurs évolutions dans le temps. Certains sont extraits des mesures aéroportées, et correspondent à des indices de végétation, à l'estimation de la biomasse, aux caractéristiques du couvert végétal (l'ensemble de ces paramètres étant bien sur mesuré pour un stade de croissance donné). Le modèle est adapté à un type de végétation dont la croissance est définie par un jeu d'équations bien particulières. En fonction des caractéristiques des paramètres requis, des instruments sont sélectionnés et leur configuration de fonctionnement sont choisis pour traiter les mesures adéquates (fenêtre spectrale, résolution, date d'acquisition, ...).

La mise en équation de la croissance d'un végétal est loin d'être simple. Il paraît difficile de tenir compte à la fois des paramètres intrinsèques de la plante (caractéristiques structurales, composition biologique, échange avec le milieu extérieur atmosphère/sol), et des paramètres extrinsèques (climat, météorologie du milieu ambiant, type de sol, érosion liée à l'environnement physique, prédateurs, ...), d'autant plus que certains de ces paramètres ne sont pas mesurables, et que de la variation dans le temps dépend du paramètre considéré. Leur dynamique étant liée à l'évolution du végétal, il est important de choisir la bonne date pour lancer une acquisition de mesures. D'ailleurs la fréquence de passage et la couverture au sol des instruments imageurs satellitaires font que leurs mesures sont très privilégiées pour atteindre ces paramètres.

4.1 LES MOTIVATIONS

Les mesures réalisées dans le domaine optique, ont certes déjà fait leur preuve. Mais l'indépendance du radar vis-à-vis de la couverture nuageuse, ajoutée à l'augmentation de la fréquence de passage due au fait que les capteurs optique/hyperfréquence ne sont pas embarqués sur la même plate-forme constituent les éléments motivant cette étude. On s'intéresse ici à quantifier l'apport du radar (donc de la prise en compte de mesures hyperfréquence) pour l'étude du suivi des récoltes de la betterave sucrière. Si la complémentarité des mesures permet d'enrichir les connaissances afin de mieux apprécier le développement du végétal, la multiplicité de celles-ci agrandit le nombre de données à considérer. Outre la complémentarité physique de ces mesures (longueur d'onde), un autre facteur très important est à considérer ici : l'aspect temporel des mesures. Car il ne s'agit pas de statuer simplement à un instant donné de l'état biologique du végétal, mais également de suivre l'évolution de cet état au cours du temps (Van Leeuwen et Clevers, 1994).

L'échantillonnage des mesures tout au long de la croissance du végétal est important. Ceci est d'autant plus vrai que, comme le comportement du végétal évolue, il faut s'attendre à ce qu'une mesure ne soit pas toujours adaptée. Aussi la considération de mesures complémentaires est un palliatif pour que le modèle reste précis tout au long de la croissance. Une étape supplémentaire doit être considérée, elle consiste à donner au modèle, les moyens de choisir la mesure la mieux adaptée et de refouler les autres. Cette stratégie pose un problème, à savoir comment réaliser la comparaison et surtout choisir le bon critère pour réaliser le choix.

4.2 LA PROCEDURE

Le déroulement de la démarche est le suivant. Pour mener à bien cette étude nous disposons de résultats de plusieurs campagnes de mesures effectuées sur des sites sélectionnés aux Pays-Bas dans la province du Flevoland (Fig. 4.2). On s'intéresse ici à un seul type de culture, la betterave sucrière. Il s'agit pour une parcelle donnée, de caractériser à un instant donné, l'état biologique du peuplement végétal. Une fois résolus les problèmes de géo-localisation (identification d'une parcelle donnée) on calcule la valeur moyenne de l'ensemble des mesures prises à un instant choisi, correspondant à cette parcelle. Ceci afin de ne plus manipuler qu'une seule valeur, représentative de la surface étudiée. A un instant donné, pour une parcelle donnée, on dispose donc d'une mesure par instrument. On possède parfois, une gamme de mesures effectuées par un instrument avec des configurations de mesure différentes (Bouman, 1993, a, b, et 1988). Le nombre de mesures peut très vite augmenter si on prend en considération différentes longueurs d'onde, différentes polarisations, différentes géométries de visées. A ces mesures s'ajoutent également des relevés de terrain, et des

relevés météorologiques (Van Kasteren, 1993, Bouman, 1991, et Van der Sanden et Visser, 1992). Vis-à-vis des données, les corrections géométriques sont peu impliquées, par contre l'aspect radiométrique (thématique) est prépondérant.

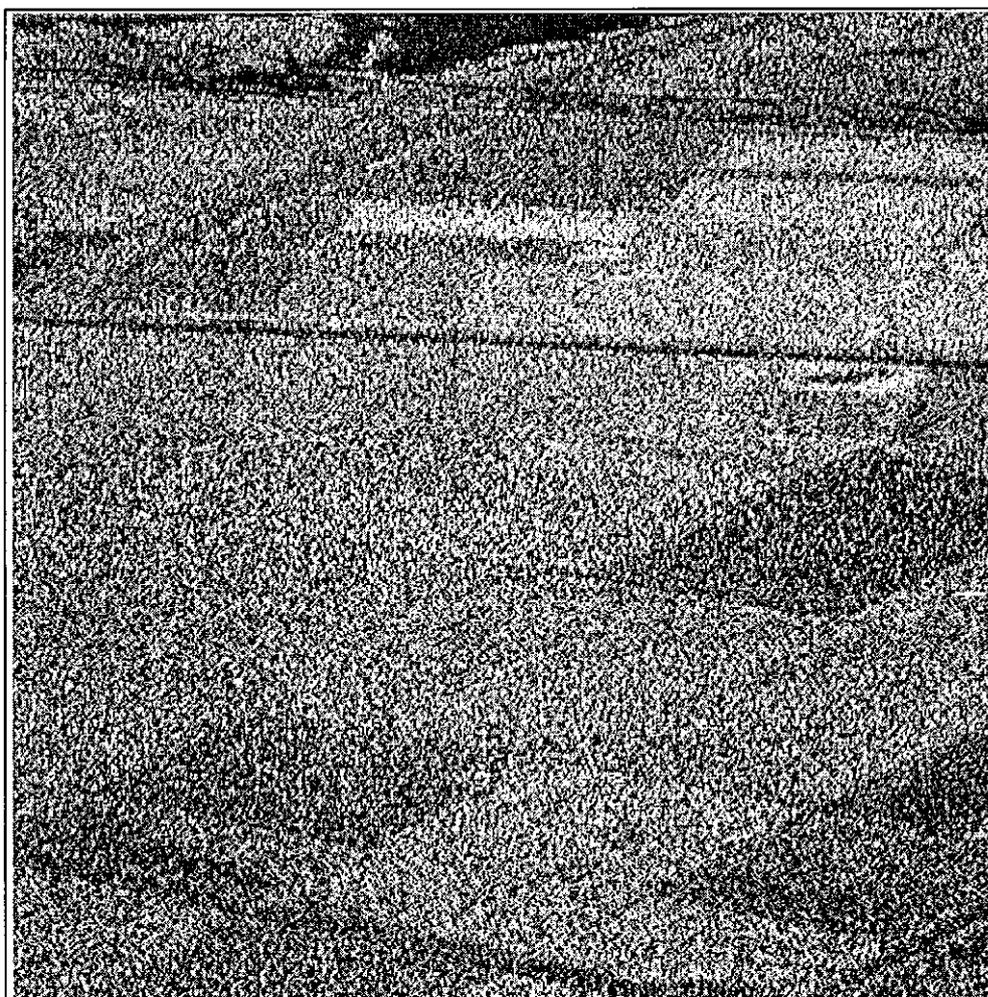


Figure 4.2 - Image du Flevoland obtenue par un SAR aéroporté

Cette image a été extraite des données issues de la campagne de mesure MAESTRO-1, réalisée en 1989 par le Joint Research Center d'Ispra. L'image choisie pour l'illustration a été acquise par le SAR aéroporté du Jet Propulsion Laboratory dont la configuration de prise de vue était : bande C, polarisation VV. On reconnaît sur cette image les découpes d'un parcellaire agricole régulier en absence de relief. Le site ayant été spécialement choisi pour sa couverture thématique et son orographie permettant de s'affranchir des effets indésirables du relief sur une mesure SAR.

Remarque : Ce site a d'ailleurs été l'objet d'un grand nombre de campagnes de mesure aéroportée, dont nous avons pu bénéficier pour rassembler les données appropriées et mener nos expériences (campagnes FMCW 1980, Agriscatt 1988, Mac Europe 1991).

Afin d'apprécier l'apport des mesures radar nous avons convenu dans un premier temps de considérer des mesures contemporaines optique et radar. Cela a été possible grâce au regroupement de plusieurs modèles : SUCROS, EXTRAD et CLOUD. Ce qui devait permettre de comparer l'aptitude des mesures radar à rendre compte de la croissance du végétal considéré par rapport à l'aptitude déjà éprouvée des mesures en optique.

Une description schématique simplifiée des modèles utilisés, dans le cadre de notre étude, est donnée sur la figure 4.3. Elle comprend d'une part le modèle SUCROS (*Simplified and Universal Crop Growth Simulator*). La croissance du végétal (c'est-à-dire l'accroissement du taux de matière sèche) est suivie grâce à la prise en compte des caractéristiques intrinsèques du végétal, de son éclairage, et de la température de l'air ambiant. Le modèle SUCROS permet de déterminer la valeur d'un indice de végétation (*Leaf Area Index*) tout au long de la croissance végétale à partir de l'intégration des nombreux paramètres énumérés ci-avant. A certaines périodes choisies de la journée l'activité photosynthétique de la plante est simulée, pour chaque feuille puis intégrée sur l'ensemble du couvert végétal. Le taux d'assimilation journalier de la plante est réparti en deux groupes, le premier pour maintenir la biomasse existante et le second pour la formation de la nouvelle matière sèche. Cette dernière est distribuée dans les différentes parties du végétal : les parties aériennes (les feuilles), et les parties non-aériennes (le tubercule), avec des proportions variables, suivant le stade du développement. La croissance du LAI est directement reliée à la croissance de nouvelles feuilles. Une description plus détaillée est accessible parmi les ouvrages cités dans la bibliographie (notamment Spitters *et al.*, 1989).

L'adjonction de deux modèles intermédiaires : EXTRAD et CLOUD réalise le lien entre les quantités déduites des simulations, donc à partir du modèle SUCROS et de ces mêmes quantités dérivées des mesures satellitaires. La réunion de ces trois modèles a été réalisée par Bouman (Bouman, 1992a), et le modèle résultant s'appelle SBFLEVO.

Figure 4.3 : Le modèle SUCROS effectue une première simulation et produit une courbe de croissance à l'aide de connaissances *a priori*. Cette courbe théorique doit être ajustée au cas traité. A partir des modèles EXTRAD et CLOUD des mesures optique et radar sont simulées à partir des résultats issus de SUCROS. Après comparaison entre les mesures simulées et les mesures, la valeur de certains paramètres est modifiée afin de générer une nouvelle courbe de croissance plus affinée. Le processus est répété sur plusieurs itérations.

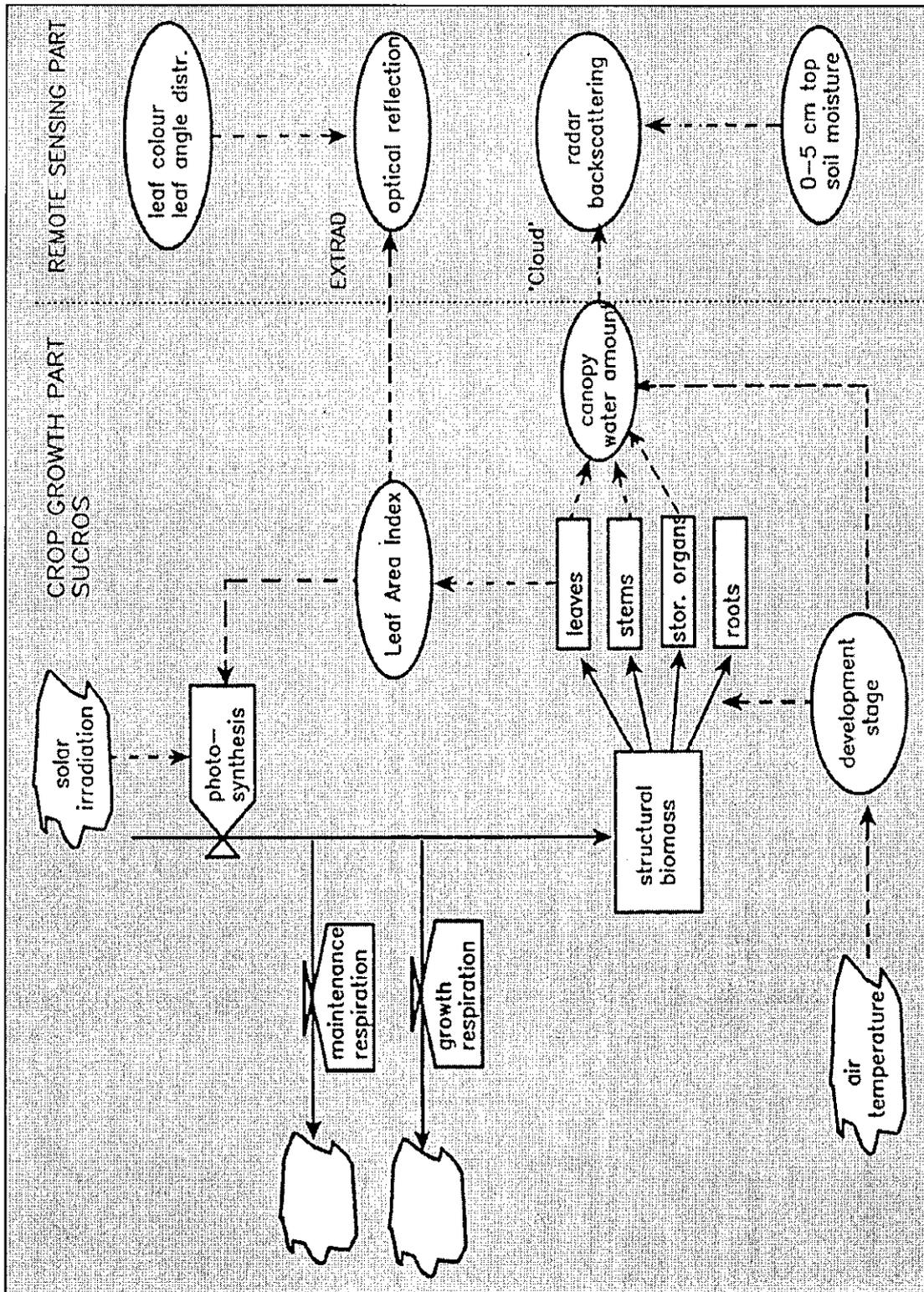


Figure 4.3 - Modèle de croissance végétale

La simulation de mesures échelonnées dans le temps sur la période de croissance est réalisée au travers des modèles EXTRAD et CLOUD qui réalisent le lien entre le résultat issu du modèle SUCROS (soit une courbe de croissance théorique) et les mesures issus des capteurs (soit une information instantanée sur l'état du végétal, à différents stades de croissance). La courbe de croissance théorique déduite est ajustée par plusieurs itérations sur les valeurs déduites des quantités mesurées. Les paramètres importants sont : d'une part le LAI et d'autre part le contenu en eau du couvert végétal. Il est possible d'extraire ces deux quantités à partir de l'analyse des mesures satellitaires.

On peut aisément retrouver le formalisme général d'un processus de fusion défini au chapitre précédent (Fig. 4.4)

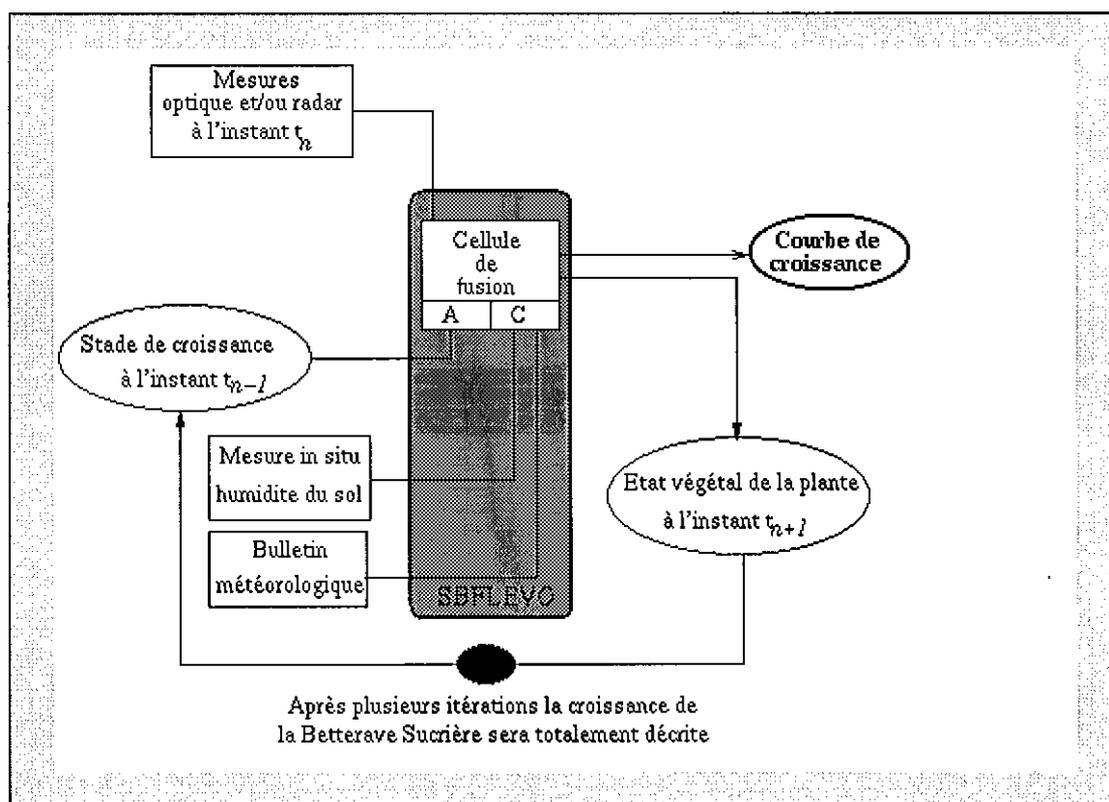


Figure 4.4 - Processus de fusion

La figure 4.4 illustre la schématisation du processus utilisé au sein du modèle de croissance SBFLEVO. Il s'agit d'un processus itératif où le résultat d'une cellule de fusion sert d'entrée pour une nouvelle étape de fusion. C'est l'incrémement du paramètre temps qui régit les assimilations de

mesures. Le résultat définitif est une courbe de croissance, illustrant la croissance complète d'une parcelle grâce à l'assimilation des mesures réparties sur toute la période de croissance.

4.3 ASSIMILATION DE MESURES CONTEMPORAINES

Le modèle assimilant des données contemporaines, dispose donc à un instant donné de la croissance, de plusieurs mesures : une mesure optique et une mesure radar. Il est important de pouvoir comparer ces mesures entre elles afin d'estimer l'apport de chacune d'elle. Aussi le besoin de déduire un paramètre commun à l'ensemble des données devient nécessaire pour mener la comparaison. L'indice de végétation : le LAI s'est révélé être un paramètre clef pour réaliser cette opération. En effet déductible à la fois des mesures optique et radar, il permet de valider l'apport d'un ensemble de mesures par rapport à l'autre. Cependant la méthode de calcul pour l'obtenir à partir des mesures dépend de l'origine de celles-ci. Il est apparu alors nécessaire d'évaluer un coefficient ou un degré de confiance afin de juger de sa qualité en fonction de sa provenance. L'estimation d'un tel coefficient est souvent une tâche très difficile, car de nombreux paramètres sont à prendre en compte.

La relation qui lie la mesure optique et le LAI est une fonction simple :

$$LAI = f(WDVI) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Le WDVI est un indice de végétation bien connu chez les agronomes (*Weighted Difference Vegetation Index*), (Girard et Girard, 1989 ; Clevers *et al.*, 1992).

La relation qui lie la mesure radar et les paramètres dérivés est un peu plus complexe :

$$\gamma \cong C(1 - \exp(-DWh / \cos \theta)) + G \exp(km_g) \exp(-DWh / \cos \theta) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- γ : rétrodiffusion radar
- C : rétrodiffusion radar d'un couvert végétal dense
- D : facteur d'atténuation du signal hyperfréquence sur la végétation
- W : contenu volumique en eau de la végétation
- h : hauteur des plantations
- θ : angle d'incidence en degré
- k : constante caractéristique du sol
- m_g : contenu volumique en eau du sol

Tandis que le LAI et le contenu en eau de la plante sont reliés par la relation suivante :

$$LAI \cong AWh, \quad (\text{Eq. 4.3})$$

où le facteur A est une constante déduite de la campagne de mesure Agriscatt 1988. On en déduit donc la relation suivante qui réalise le lien entre γ et le LAI :

$$\gamma \cong C(1 - \exp(-DLAI / A \cos \theta)) + G \exp(km_g) \exp(-DLAI / A \cos \theta) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Pour simplifier cette relation on pose :

$$K \equiv C - G \exp(km_g) \quad \text{et} \quad D' \equiv D/A \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\text{de sorte que : } \gamma \cong C - K \exp(-D' LAI / \cos \theta) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$\text{aussi : } LAI \cong -\cos \theta / D' \cdot \ln((\gamma - C) / -K) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

La figure 4.5 illustre la démarche entreprise lors des premiers tests menés sur un jeu de données mixtes contemporaines. L'ensemble des données permettaient de déduire deux valeurs pour le LAI : l'une dérivée de la réflectance (calculé par EXTRAD), l'autre dérivée du coefficient de rétrodiffusion (calculé par CLOUD).

La stratégie de fusion suivie ici fait appel à une loi d'inférence (les mesures ne sont pas physiquement mélangées). Le modèle est apte à générer deux courbes de croissance puisqu'il dispose de deux jeux de données optique/hyperfréquence. Lors de l'analyse globale des courbes déduites, on procède à une comparaison entre : d'une part la courbe issue de l'assimilation des mesures optiques, et d'autre part la courbe issue de l'assimilation des mesures radar. Il s'est avéré que sur l'ensemble du jeu de mesures, les mesures optique réalisent un meilleur suivi de la croissance. Par contre il n'est pas surprenant, lorsqu'on analyse les individualités, de trouver qu'une mesure radar est parfois plus crédible qu'une mesure optique. Cette dernière peut être entachée d'une erreur supérieure, due à des facteurs physiques perturbants, propre à la nature de la mesure. C'est pourquoi, plutôt que de comparer des ensembles de mesures sur toute la période de croissance, il semble que la comparaison des individus (à un instant choisi) soit plus adaptée à notre étude, même si ce protocole d'expérience soulève d'autres problèmes.

Il s'agit d'étudier à un instant donné, les résultats produits par le modèle numérique de croissance : c'est-à-dire comparer les paramètres extraits des mesures. Comme l'obtention du LAI diffère suivant la source dont il est issu, (mesure optique ou mesure radar) l'erreur commise dans son calcul n'est pas directement comparable. En effet le calcul de cet indice suivant des voies différentes, les approximations et le taux d'erreur apporté par les calculs sont différents et doivent être ramenés sur une même base. Si bien qu'il n'est pas toujours facile d'évaluer directement l'exactitude d'une

mesure, souvent c'est la courbe de croissance déduite qui permet de rejeter une mesure trop éloignée de la prédiction faite à partir de l'ensemble des acquisitions.

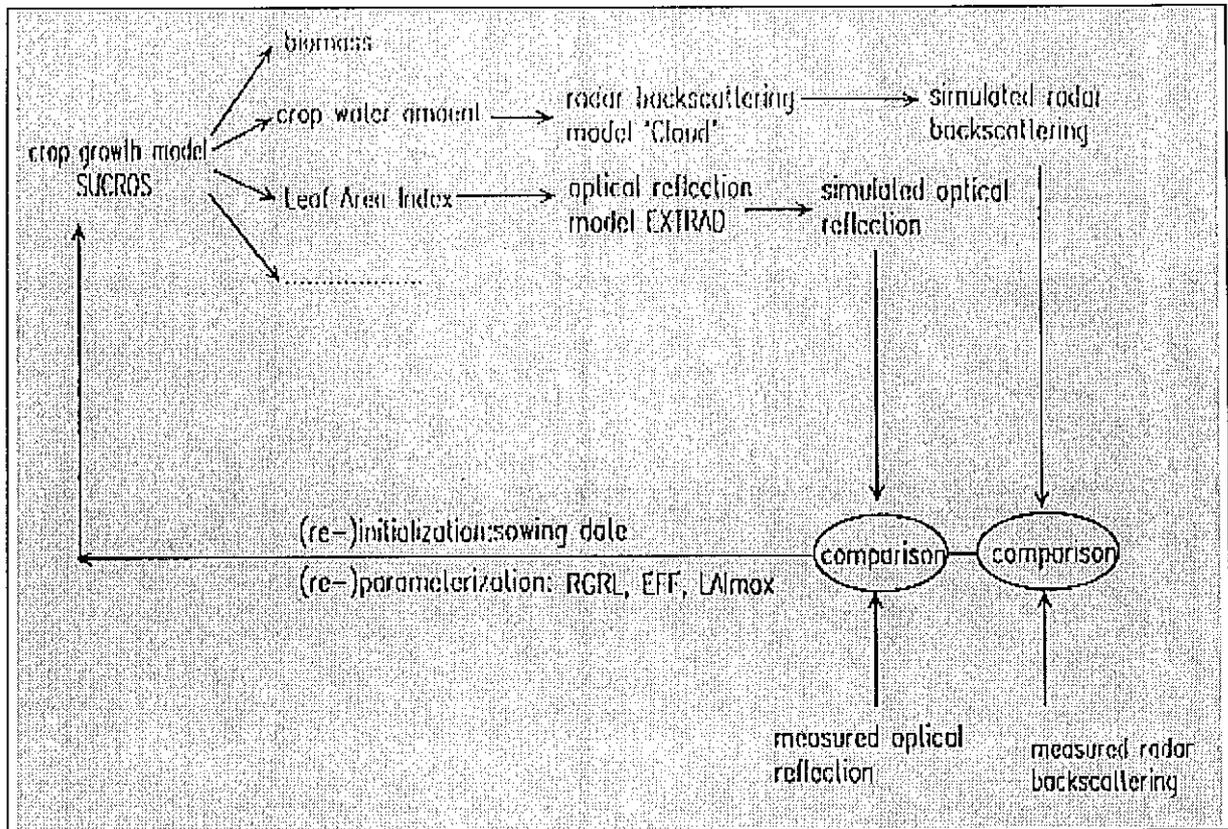


Figure 4.5 - Le modèle SBFLEVO

Figure 4.5 : Le modèle SUCROS effectue une première simulation et produit une courbe de croissance à l'aide de connaissances *a priori*. Cette courbe théorique doit être ajustée au cas traité. Les résultats du modèle SUCROS fournissent tous les éléments pour simuler des acquisitions de mesures échelonnées sur la croissance du végétal. A partir des modèles EXTRAD et CLOUD des mesures optique et radar sont respectivement simulées à partir de paramètres extrapolés adaptés au végétal étudié. Certains de ces paramètres vont pouvoir être corrigés en fonction de la parcelle étudiée afin de mieux la caractériser. Après comparaison entre les mesures simulées et les mesures, la valeur de ces paramètres est modifiée afin de générer une nouvelle courbe de croissance plus fidèle à la croissance particulière de la parcelle étudiée. Le processus est répété sur plusieurs itérations ainsi l'assimilation des valeurs permet d'affiner la simulation du modèle et d'aboutir à une courbe de croissance bien ajustée.

A un instant donné, le modèle numérique qui réalise la fusion choisit parmi les échantillons de mesure, le plus juste pour décrire le stade de croissance du végétal. La qualité de la mesure sert de critère de choix. En fin de processus, les mesures prises en compte sont intégrées mais leur provenance

reste connue. L'association de l'ensemble des mesures est représentée par un graphe déduit de l'exécution du modèle numérique, c'est-à-dire la courbe de croissance du végétal.

Le manque d'une base de données échelonnées sur la croissance globale du végétal, a rendu difficile l'expérience. En effet la quantité d'informations à réunir pour une étude est considérable, d'autant plus que l'on s'intéresse à l'aspect contemporain des mesures. Le nombre trop restreint de parcelles étudiées ne nous a pas permis de valider complètement notre approche. Cependant certains comportements ont été relevés et méritent d'être notés :

- * d'une part la meilleure aptitude de l'optique vis-à-vis du radar pour rendre compte de l'état du végétal. Par contre si la mesure optique est inutilisable (donnée apportant un taux d'erreur trop grand) alors le modèle se comporte mieux avec une mesure radar plutôt qu'en absence de mesure.

- * d'autre part la fin de la croissance de la plante est marquée par le développement d'un couvert végétal très dense. Si bien qu'en fin de croissance le capteur se retrouve face à un tapis uniforme. La mesure radar atteint alors une valeur constante (un pallier) qui ne permet pas de poursuivre le suivi de l'évolution de la plante. Les mesures radar seront donc préférées en début de la période végétative.

Les simulations effectuées ont permis d'identifier la mesure la plus appropriée pour rendre compte de l'état biologique du végétal. Les aspects géométriques très influents sur la mesure radar (distribution angulaire des feuilles) jouent un rôle important. La qualité de la mesure radar en début de croissance est appréciable, surtout lorsqu'il s'agit de déterminer la date de la naissance de la plante. En début de croissance les mesures effectuées comprennent à la fois des participations dues aux végétaux et des participations dues au sol, ce dernier n'étant pas encore recouvert par le feuillage. La mesure radar est très sensible au taux de participation de chacune des cibles.

4.4 ASSIMILATION DE MESURES NON CONTEMPORAINES

Dans un premier temps nous nous sommes attachés à l'exploitation de **données contemporaines mixtes** (optique/radar). L'analyse de caractères complémentaires des données permet de décrire, certes avec plus de précision la croissance végétale à un stade donné. Cependant il était nécessaire, dans une première expérience, d'extraire des caractères redondants, afin de comparer la justesse des informations et surtout d'évaluer l'apport des mesures multispectrale les unes par rapport aux autres (analyses de données contemporaines). Par la suite, après avoir éprouvé l'apport des mesures radar au sein de cette application nous avons procédé à des assimilations de données non-contemporaines, pour disposer d'un jeu de mesures plus étalé dans le temps afin de mieux guider le modèle, avec une préférence pour des mesures radar en début de croissance bien sûr.

Un exemple de traitement est illustré sur la figure 4.6.

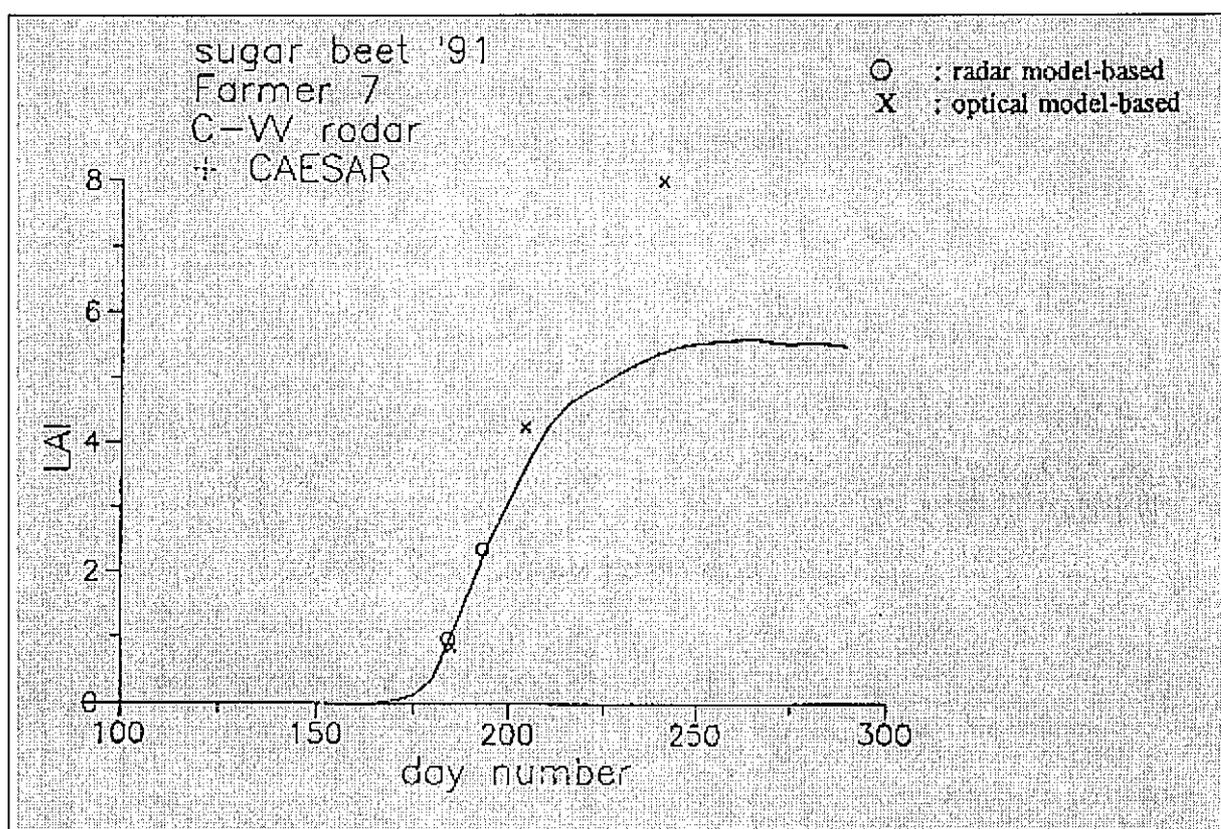


Figure 4.6 - Courbe de croissance, assimilation de données non-contemporaines

La figure 4.6 illustre un cas réalisé sur un jeu de données issues de la campagne de mesure CAESAR. La courbe de croissance du végétal a été déduite à partir de cinq mesures dont deux mesures radar et trois mesures optiques. La naissance des végétaux a eu lieu vers le 150^{ème} jour de

l'année soit à la fin du mois de mai. Si le déroulement de la croissance n'est pas perturbé par des facteurs importants on obtient une courbe classique d'évolution pour la Betterave Sucrière illustrée ci-dessus. Cette dernière sert de point de départ pour de nouvelles études relatives aux statistiques agricoles (Ricciello, 1993).

Cette nouvelle démarche fait appel cette fois-ci à une loi d'incorporation, puisqu'ici le choix n'est plus basé sur la source de la mesure mais sur l'instant d'acquisition de la mesure. Les mesures optique jouent un rôle important, on sent bien qu'elles contraignent fortement le modèle. Les mesures radar quant à elles, complètent la distribution temporelle des mesures considérées, mais restent ancillaires. Cette situation est en partie liée au manque d'expérience de l'utilisation thématique des informations extraites à partir de mesures radar. Comme le modèle EXTRAD a été largement éprouvé, comparé au manque de validations effectuées sur le modèle CLOUD, la mesure optique garde une place de choix vis-à-vis de son homologue radar et sera mieux exploitée.

Seules des évaluations plus approfondies menées à partir du modèle CLOUD pourraient conforter la confiance accordée aux mesures radar. Celles-ci seraient alors revalorisées vis-à-vis des mesures optique. Pour cela, nombre d'applications doivent être réalisées, faisant appel aux thématiciens pour statuer de l'apport du radar dans de telles études et justifier de l'opération de fusion.

4.5 CONCLUSION

Le modèle de croissance apte à assimiler un ensemble de mesures mixtes optique/radar, permet de suivre l'évolution de la plantation par intégration sur un intervalle de temps propre à la croissance du végétal étudié. Une courbe de croissance est obtenue, permettant ainsi d'effectuer des prévisions. La mesure optique occupe toujours une place de choix parmi les mesures utilisées. Cependant la mesure radar semble très adaptée à l'étude des variations temporelles de la culture telles que : humidité du sol, taux d'occupation du sol, structure du végétal (distribution angulaire des feuilles). Tandis que la mesure optique semble mieux adaptée à la description de l'état biologique du végétal. Ces aspects complémentaires renforcent la continuité de telles études d'autant plus que les enjeux sont considérables. Ainsi on s'intéresse à la maturation du végétal, à la date la plus appropriée pour réaliser la récolte, au rendement attendu. Ces notions parfois loin de nos préoccupations premières sont de toute importance car lorsque la surface agricole concerne de grandes surfaces. Les moyens débloqués pour la récolte atteignent des sommes considérables, sans compter la fixation du taux d'échange sur le marché mondial (Polsky, 1994).

FUSION DE PIXEL
APPLIQUEE AUX IMAGES SATELLITAIRES
SPOT ET ERS

FUSION DE PIXEL
APPLIQUEE AUX IMAGES SATELLITAIRES
SPOT ET ERS

Nous venons de décrire un exemple de fusion d'attribut où l'interprétation thématique faite à partir de la mesure est prépondérante. Nous allons aborder maintenant un autre type de fusion : la fusion de pixel appliquée aux images satellitaires SPOT, et ERS. L'accent est mis avant tout sur la qualité géométrique. En effet, avant de réaliser toute application, quelle qu'elle soit, il est nécessaire que les différentes sources d'information soient cette fois-ci, superposables. On s'intéresse donc à l'information contenue dans chaque pixel. Les différentes modalités doivent être ramenées dans le même référentiel, la précision avec laquelle ces dernières se superposent influence grandement le résultat de l'opération de fusion.

Pour plus de clarté, nous avons séparé en trois, l'exposé sur cette dernière application. Nous discuterons du choix du référentiel commun et des problèmes rencontrés pour transférer les différentes modalités dans le référentiel choisi dans un premier chapitre (chapitre 5). Nous décrivons alors la méthode mise en oeuvre pour réaliser le transfert de toutes les modalités dans ce référentiel, dans le chapitre 6. Et enfin, des résultats seront présentés sur un couple d'images SPOT/ERS sur le site de la Durance. Il couvre la région de Briançon, englobant le massif de la barre des écrins avec des sommets dépassant les 3000 mètres d'altitude et l'étroite vallée de la Durance. Les reliefs caractéristiques et très accidentés de cette région ont constitué un excellent échantillon pour tester nos algorithmes.

L'expérience acquise dans le cadre du traitement de l'imagerie optique a contribué fortement à l'aboutissement de la nouvelle approche proposée. Ces compétences ont largement guidé nos pas, de même que la fusion de données en tant qu'outil de conditionnement pour les images radar, a su apporter des solutions face aux problèmes rencontrés. Cette collaboration multicapteur nous a apporté une nouvelle conception quant à la collaboration des données mixtes. En effet des voies nouvelles ont été explorées : d'une part pour améliorer la sélection des points homologues entre une image de référence (image synthétique) et une image radar brute, et d'autre part pour la formulation d'une loi de redistribution de l'information sur une nouvelle grille. Nous avons tenu à porter notre effort sur les étapes de ré-échantillonnage, qui sont responsables pour beaucoup de la qualité du résultat.

Chapitre 5

CHOIX DU REFERENTIEL TERRESTRE ORTHOGONAL

5.1 REFERENTIEL GEOMETRIQUE COMMUN - ORTHO-IMAGE

Il est nécessaire bien souvent pour croiser des informations, de les transférer au préalable dans un **référentiel commun**, afin de réaliser la fusion. On désire ici combiner **au niveau du pixel** les différentes données. Aussi une mise en correspondance précise constitue une part importante des enjeux. Il s'agit de manipuler non seulement plusieurs images de télédétection spatiale, mais aussi très souvent d'autres types d'informations dites externes : soit issues d'une carte géographique, soit issues de relevés de terrains constituant une base de mesure *in situ*, etc... Une fois réunies, il s'avère parfois utile d'appliquer par la suite sur ces données, des traitements plus avancés afin d'en extraire une information d'un niveau sémantique plus élevé. La tâche est relativement complexe puisqu'au départ on dispose de plusieurs sources d'informations **hétérogènes**, ne possédant pas le même référentiel *a priori*.

Une telle démarche aboutit généralement, à la construction d'un plan unique contenant une information enrichie par les multiples **sources juxtaposées ou composées**. Reste maintenant à définir le référentiel final dans lequel sera représentée cette information. Les remarques sur les origines variées de ces données suffisent pour entrevoir l'étendue du problème. Le premier point sur lequel nous avons réfléchi, nous a amené à définir un référentiel commun capable de supporter les données provenant de ces sources multiples. L'idée maîtresse étant de disposer d'un espace dans lequel toutes les données seraient **superposables** géométriquement. La définition d'un espace commun doit être rigoureusement décrite pour qu'il n'y ait pas d'équivoque.

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes consacrés à la **fusion de pixel dans un référentiel terrestre orthogonal**. Le premier but à atteindre dans un tel type de fusion consiste à transférer les images optique et radar dans le même espace afin qu'elles soient **co-géoréférencées** et, qui plus est, **superposables**. Les applications utilisant les résultats de la fusion de pixels touchent pour beaucoup le domaine de l'interprétation thématique et structurale des images. Celles-ci s'intéressent au contenu des images et surtout à la fidélité de reproduction des formes en fonction de

leurs répartitions spatiales (Pénicand *et al.*, 1995). Aussi les images doivent posséder une bonne qualité intrinsèque (radiométrique et géométrique) avec le moins de distorsions possibles. La superposition des différentes modalités est primordiale puisque c'est de sa qualité que vont dépendre les résultats et par voie de conséquence, la qualité de la **synergie** des données rassemblées dans cet espace.

Les référentiels originaux des images satellitaires sont les référentiels de l'instrument SAR à bord de ERS et de l'instrument HRV à bord de SPOT. Si on veut associer ces données à d'autres, trois possibilités se présentent. Soit on garde le référentiel d'un instrument comme référentiel général de représentation (Djamdji *et al.*, 1993), soit on choisit un référentiel parmi les référentiels de représentation des données externes que l'on compte associer (Renouard et Perlant, 1993), soit on définit un nouveau référentiel dans lequel devront être transférées toutes les données. Le choix dépend en général de l'application à laquelle sont destinées les données. Il faut noter que toutes les transformations de changement de référentiel sur ces données ne peuvent se faire sans diminuer la qualité de celles-ci. Reste à déterminer les compromis que l'on est prêt à accepter et vis-à-vis de quels types de données. En général on préfère se reporter à un référentiel assujéti à la surface terrestre. D'une part, parce que c'est un référentiel dans lequel il est plus habituel de travailler. Et d'autre part, c'est un référentiel adapté à l'assimilation des différents types de données, sans pour autant devoir appliquer des traitements trop dégradants.

Pour rester homogène avec ce qui existe déjà, il semble judicieux de choisir un référentiel parmi les référentiels standards utilisés pour les représentations géographiques. Les données prises en compte sont certes issues de sources différentes, mais elles concernent toutes l'analyse de la surface terrestre. Les plus utilisées seront l'imagerie satellitaire, associée aux cartes géographiques souvent indispensables, et leurs produits dérivés (tel qu'un modèle numérique de terrain par exemple). A celles-ci pourront se rajouter des analyses de terrain *in situ*, des relevés météorologiques, etc. Même si à l'origine le but est de réaliser la fusion entre deux images satellitaires il ne faut pas oublier les applications qui en découlent, et les autres données nécessaires à la réalisation des études. Ces données ont un élément commun puisqu'elles caractérisent souvent un état de surface, ou bien un état d'activité de la surface terrestre et de son milieu environnant, l'atmosphère. Elles sont donc toutes géoréférencées par rapport à la surface terrestre, ou du moins, elles peuvent l'être moyennant certains traitements.

Le référentiel choisi se présente donc de la façon suivante, il s'agit d'un **référentiel orthogonal**. L'origine du référentiel est disposée au centre de la région étudiée, sur le plan tangent en ce point à un ellipsoïde de référence. Les directions des axes principaux seront prises suivant la direction de latitude, longitude (Lambert III). Il ne reste plus qu'à définir la norme des axes qui

constituent ce référentiel. Afin que les différentes modalités manipulées soient superposables au pixel près, nous avons opté pour un référentiel normé. Nous nous sommes attachés dans un premier temps à l'élaboration de modèles géométriques pour transférer les images des satellites SPOT et ERS depuis leur référentiel d'origine respectif vers ce référentiel terrestre commun orthonormé. Ce qui revient à construire des images dites "ortho".

Une ortho-image est classiquement décrite de la façon suivante : c'est une image qui serait obtenue à l'aide d'un satellite placé à l'infini et effectuant une visée au nadir pour disposer d'une image de la surface terrestre. Les critères de visée au nadir associés au fait que le capteur soit placé à l'infini permettent de s'affranchir des aberrations des longueurs géométriques que l'on rencontre usuellement sur les images satellitaires. De plus, l'ouverture de l'instrument suffisamment petite pour observer une portion de Terre de quelques centaines de kilomètres carrés, permettrait de négliger les effets de la courbure de la Terre. Si bien que la simulation d'un tel instrument sur de telles zones consiste à réaliser une certaine **projection du sol terrestre sur le plan image**. Il existe de nombreuses représentations planes de la surface terrestre. Celles-ci font appel à un système de représentation régit par un ensemble de loi géométrique ou mathématique (Cartographie spatiale de la Terre, 1979). Parmi les référentiels cartographiques existants, nous avons choisi un référentiel ortho-normé dans lequel le plan image est défini comme le plan tangent à un ellipsoïde de référence, au centre de scène. Une projection orthogonale de la surface terrestre sur ce plan est alors réalisée pour obtenir l'ortho-image correspondante. L'échantillonnage spatial de l'image résultante (en terme de surface projetée sur l'ellipsoïde) sera alors uniforme sur la totalité de la scène.

5.2 CHANGEMENT DE REFERENTIEL - CAS PARTICULIER DU SAR

Les descriptions des instruments imageurs embarqués sur les plate-formes SPOT et ERS faites dans le deuxième chapitre nous renseignent quant aux transformations géométriques que devront subir ces images pour réaliser le changement de référentiel. Les opérations menées sur les images optique et radar seront différentes. Les techniques de construction des ortho-images optique sont déjà très éprouvées (Caloz *et al.*, 1991 ; Novak, 1992), ce qui n'est pas le cas pour l'imagerie radar. Aussi nous avons porté tout notre effort sur l'élaboration d'une chaîne de traitements pour construire des ortho-images radar. Cette procédure, quoique inspirée des traitements effectués sur les images optique, comporte des étapes originales liées au caractère typique de l'imagerie radar. Dans la mesure où nous nous sommes intéressés à des zones de relief très accidenté, il s'agit de traiter un cas peu conventionnel, soit la construction d'une ortho-image radar sur des régions montagneuses.

Plusieurs techniques de rectification géométrique d'image SAR existent. Il s'agit de construire un modèle numérique qui réalise des déformations géométriques. Ce modèle regroupe un ensemble d'équations qui permet de déduire à partir des coordonnées d'un point de la surface terrestre éclairé (exprimées dans un référentiel terrestre), les coordonnées de ce même point sur le plan image (exprimées dans le référentiel instrument). Nous avons vu dans le second chapitre l'ensemble des phénomènes physiques qui conditionnent l'exactitude de ce positionnement : l'attitude, l'orbitographie du satellite, le fonctionnement de l'instrument (principe d'acquisition), et l'interaction du signal avec le milieu traversé : l'atmosphère. La méconnaissance des paramètres géométriques de prise de vue entraîne des erreurs de positionnement parfois importantes. L'influence de certains peut être négligée vis-à-vis d'autres beaucoup plus importantes. Suivant la confiance que l'on accorde à la connaissance de ces derniers, la méthode développée sera différente.

Une première méthode se distingue ; elle repose sur la formation d'un modèle totalement analytique (Kwok *et al.*, 1987 ; Raggam, 1987) en supposant parfaitement connus les paramètres géométriques de prise de vue. La modélisation complète de l'acquisition d'une image radar est réalisée, elle comprend la modélisation de tous les phénomènes physiques, rappelés ci-dessus, qui influencent la représentation géométrique de la surface terrestre dans le plan image. Cette méthode permet de connaître directement la position d'un point de l'image dans une nouvelle projection. La précision de cette méthode repose sur l'exactitude des équations mises en œuvre et sur la précision des paramètres qui sont manipulés.

L'expérience du traitement des images ERS étant encore relativement jeune, nous avons choisi d'appliquer un autre type de méthode pour ne pas être dépendant de la précision de ces paramètres (Naraghi *et al.*, 1983 ; Domik *et al.*, 1986). Cette méthode, analytique elle aussi, propose de construire une image synthétique radar à partir de la simulation d'un radar imageur. Un premier modèle analytique est construit à partir des paramètres qui sont soit estimés, soit fournis avec l'image brute. L'application de ce modèle permet de fabriquer une image radar synthétique dont le positionnement par rapport à l'image radar brute dépend de la précision des paramètres nominaux. Un second modèle numérique est ensuite calculé pour réaliser la superposition de l'image synthétique issue de la simulation et de l'image brute. Ce modèle est déduit à partir de la sélection de points homologues et finalise le premier modèle, en corrigeant les erreurs de positionnement dues à l'imprécision des paramètres nominaux.

La recherche de procédé automatique de rectification d'image SAR quelque soit le type de relief étudié, a motivé de nombreux auteurs pour le développement de ces approches (Guindon, 1987 ; Djamdji, 1993). Mais l'inconvénient majeur repose sur le fait que ces méthodes sont tributaires de la qualité du MNT.

La méthode de changement de l'espace de représentation d'une image satellitaire que nous avons choisie, est associée à une opération de mise en correspondance (Toutin *et al.*, 1992). Cette dernière est traditionnellement décomposée en trois tâches élémentaires : tout d'abord, recherche de points homologues entre l'image brute (exprimée dans le référentiel du satellite) et une image de référence (exprimée dans un référentiel choisi). Ensuite, à partir de ces amers, construction d'un modèle de déformation géométrique qui permet de réaliser le changement de référentiel, et de transformer les coordonnées (X,Y) d'un pixel de l'image satellitaire, en coordonnées (x,y) du pixel correspondant sur l'image de référence (ou vice versa, suivant l'application du modèle direct ou inverse).

Le modèle numérique direct peut s'écrire de la façon suivante. Soit un point X, Y , de l'image brute et soit son point homologue dans l'image de référence x, y . Le modèle de déformation pour passer de l'ensemble (X,Y) à l'ensemble (x,y) , est généralement formalisé par deux polynômes de degré N tels que :

$$x = \sum_{p=0}^N \cdot \sum_{q=0}^{N-p} a_{pq} \cdot X^p \cdot Y^q \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$y = \sum_{p=0}^N \cdot \sum_{q=0}^{N-p} b_{pq} \cdot X^p \cdot Y^q \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Suivant l'importance des déformations, le degré du polynôme varie. En général pour des représentations de géométrie voisine un polynôme de degré un suffit. Ce modèle analytique formalise pour une image donnée le passage de sa représentation originale (dans le référentiel de l'instrument) à sa représentation bien souvent cartographique (dans un référentiel terrestre). L'information étant discrète cette étape pose *a fortiori* des problèmes de ré-échantillonnage.

A chaque couple (X,Y) est associé un compte numérique Z : mesure enregistrée sur l'image brute. Le transfert de l'information se fait par application du modèle inverse. C'est-à-dire que pour chaque couple (x,y) de la grille de référence, nous allons chercher la valeur z à affecter à cette position. Ce qui revient à calculer la position du point considéré dans le référentiel de l'image brute (X,Y) pour trouver Z . Dans le cas où X , et Y sont des nombres entiers, alors $z=Z$. Or il n'est pas rare qu'on obtienne des valeurs non entières pour (X,Y) , aussi on effectue une interpolation pour attribuer à la position (x,y) un compte numérique le plus réaliste possible : c'est-à-dire une valeur z déduite à

partir de l'ensemble de mesures originales $\{Z\}$ qui encadrent la position (X,Y) . Ce qui constitue la dernière étape avec le transfert de l'information sur une nouvelle grille, en utilisant une méthode de ré-échantillonnage telle que : plus proche voisin, ou bien interpolation bi-cubique,...ou autre (Ranchin, 1991).

Nous venons de décrire les trois étapes importantes d'un changement de référentiel d'une image. Elles impliquent deux types de modifications : des déformations géométriques, et des déformations radiométriques. Les déformations géométriques sont formalisées par l'écriture d'un modèle numérique. Ce modèle est simple si l'image brute à transférer et l'image de référence sont relativement proches (c'est-à-dire présentent des points homologues faciles à apparier). Or, lorsque nous observons une image radar, il est difficile de lui attribuer une image de référence parmi les standards utilisés pour l'imagerie optique (carte géographique, MNT). Ceci est d'autant plus vrai que nous nous intéressons à des régions montagneuses. En effet, pour des régions de plaines où le relief est très peu marqué, il est possible d'utiliser une image de référence classique pour construire le modèle de déformation géométrique. Par contre, dès que le relief s'accroît, il faut se doter d'un nouveau type d'image capable d'assumer le rôle d'image de référence pour transférer l'image radar brute dans un référentiel terrestre choisi. Cette image de référence doit avoir à la fois des points communs avec l'image radar brute, mais également posséder des liens avec un référentiel terrestre orthogonal. La construction de cette image de référence mérite que l'on s'y attarde.

En ce qui concerne la formation d'une image radar et le principe d'acquisition, on peut conclure que les lignes sont indépendantes les unes des autres. Aussi pour plus de simplicité nous allons discuter des traitements appliqués sur une ligne, sachant qu'ils peuvent être généralisés à l'ensemble des lignes. Ce qui revient dans notre étude à considérer des profils de terrain, en considérant chaque profil indépendant des uns des autres. Pour cela il est nécessaire au préalable d'orienter les profils de terrain dans la direction de visée de l'instrument. La position des lignes sur le terrain est déduite à partir des informations annexes qui sont fournies avec l'image. Il s'agit des coordonnées du centre de scène et des quatre coins de l'image définis dans le référentiel de l'instrument. Le MNT est ré-échantillonné de sorte que ses lignes soient parallèles aux lignes de l'image acquises par l'instrument.

5.3 CONSTRUCTION D'UNE IMAGE SYNTHETIQUE SAR

Première exigence à respecter : créer une image synthétique dont les caractéristiques géométriques sont très voisines de l'image radar originale, sur laquelle il sera aisé de sélectionner

des amers. Pour cela, il faut modéliser l'enregistrement des mesures effectuées par un SAR en fonction des caractéristiques du relief. Deuxième exigence à respecter : conserver en mémoire l'expression de cette image de référence dans le référentiel orthogonal terrestre choisi. En effet il ne faut pas oublier que l'on cherche à passer du référentiel terrestre orthogonal au référentiel du satellite. Ses deux exigences peuvent être réalisées par la prise en compte d'un MNT. Il permet d'accéder à l'orographie du terrain, et comme il s'exprime dans un référentiel orthogonal terrestre, la deuxième exigence est satisfaite également.

La création d'une image synthétique est décomposée en trois parties qui définissent un simulateur de prise de vue SAR. La première partie consiste à l'élaboration d'un modèle géométrique. La seconde partie utilise un modèle radiométrique pour synthétiser l'ensemble des mesures radar. La représentation temps/distance d'une image SAR modifie la distribution de l'information. Nous avons discuté des phénomènes physiques responsables des irrégularités de la grille de représentation. C'est en terme d'élément de surface couverte au sol que l'échantillonnage est irrégulier. Aussi la troisième partie est réservée au processus de ré-échantillonnage spécialement adapté pour gérer les irrégularités de la nouvelle grille de représentation. Nous allons maintenant décrire ces trois parties.

5.3.1 Modèle géométrique

Nous avons procédé à la simulation d'un éclairage radar au-dessus d'un MNT pour obtenir une image synthétique radar. Comme l'image synthétique que nous recherchons à former aura pour fonction de servir d'image de référence, nous nous intéressons de prime abord aux qualités intrinsèques de cette image. Le MNT qui renseigne sur la géométrie (altimétrie) de la portion de sol observée, associé aux paramètres instrumentaux (trajectoire, caractéristiques du capteur) qui renseignent sur la géométrie de prise de vue, définissent les données d'entrée nécessaires au simulateur.

Cette simulation peut se faire de deux façon : soit par la méthode dite de lancer de rayon (Taket *et al.*, 1991), soit par la méthode dite d'accumulation (Armand, 1993). La première méthode n'est pas adaptée aux problèmes d'imagerie fréquemment rencontrés quand on observe une surface dont le relief est très accidenté. Nous avons explicité au chapitre 2 différents cas d'imagerie, l'emploi de cette méthode ne permet pas de traiter les problèmes de cumul. Aussi nous avons opté pour la deuxième méthode plus appropriée à nos expériences. Celle-ci procède ainsi : pour chaque point du sol étudié, la distance radiale au capteur est calculée. Ce qui permet de connaître sa position sur l'image, puis la configuration de visée et l'orographie du sol (angle d'incidence local) permettent de déduire à quels cas d'imagerie nous avons affaire.

Cette simulation permet d'écrire un premier modèle de déformation géométrique. Ce modèle regroupe les opérations mathématiques pour réaliser le changement de référentiel et correspond à la fonction f décrite dans le second chapitre. Le résultat de l'opération ici est d'amener le MNT dans le référentiel de l'instrument. Grâce au MNT, on dispose d'un moyen de connaître la position sur l'image, des artefacts dus au relief. Dans (Kropatsch et Strobl, 1990) une méthode est donnée pour cartographier deux cas d'imagerie : les zones d'ombre et les zones d'inversion. Cependant il est également utile d'apprécier la disparité des tailles des pixels. Suivant la configuration de la topographie de la région observée, il sera utile d'analyser cette répartition en fonction des objets d'intérêts. Lorsqu'on s'intéresse à une région au relief très accidenté, la dynamique de la distribution des tailles de pixels est très élevée. Cette variation de taille est très importante vis-à-vis de l'échelle des objets qu'on cherche à analyser sur la scène puisqu'elle va influencer la probabilité de détection (si tel est le but recherché). Cette simulation crée aussi une première image que nous avons appelée **image des ambiguïtés**. Elle permet de situer les zones citées ci-dessus mais ne constitue qu'un résultat intermédiaire.

De plus une étude statistique de la répartition des différents cas d'imagerie permet de déduire le nombre de cas d'imagerie favorable. Cette étude dépend bien sûr de la région étudiée, du type d'orographie rencontré et de la configuration de prise de vue (phase ascendante, ou descendante). Cette remarque est importante pour la suite, car elle permettra souvent d'étayer les conclusions de l'analyse radiométrique effectuée sur l'image traitée.

L'image synthétique SAR est obtenue par l'application du modèle géométrique précédemment défini et d'un modèle radiométrique. Il faut maintenant discuter de la mesure $z_{ik} = \{\sigma'_{ik}\}$ qui sera affectée à chaque pixel (repéré par les indices de ligne, colonne i,k), et décrire la fonction g évoquée au second chapitre, relative au modèle radiométrique.

5.3.2 Modèle radiométrique

Face au grand nombre de paramètres qui influencent une mesure radar, il est nécessaire de poser certaines hypothèses qui conditionnent le résultat de la mesure. Le modèle radiométrique choisi permet d'obtenir un ensemble de mesures synthétiques $\{\sigma'_{ik}\}$ en faisant les hypothèses suivantes :

- permittivité du sol constante,
- rétrodiffusion isotrope,

Remarque : Comme le filtrage du speckle fait partie des pré traitements qui seront appliqués sur l'image brute radar, l'ensemble des mesures synthétiques $\{\sigma'\}$ sera par la suite comparé à l'ensemble des mesures originale déjà filtrée $\{\sigma\}$. Aussi le phénomène du speckle n'a pas été simulé.

Les variations radiométriques observées sont liées d'une part à l'orographie, et d'autre part à la couverture thématique, du terrain observé. Mais la contribution due à la couverture thématique du sol produit des effets de second ordre, comparés à ceux produits par l'orographie du sol et ce lorsqu'on étudie des régions de relief accidenté (Guindon et Maruyama, 1986).

Pour les raisons évoquées ci-dessus nous nous sommes contentés de procéder à une simulation incohérente du signal. C'est-à-dire que la simulation d'une mesure (coefficient de rétrodiffusion) ne repose que sur la prise en compte des valeurs de l'angle d'incidence local (Domik *et al.*, 1986), et de la géométrie de prise de vue qui entraînent des déformations suivant les cas d'imagerie (cf. chapitre 2).

Lorsqu'on s'intéresse à une région montagneuse, la seule prise en compte des variations de relief sur l'influence de la mesure suffit à générer une image synthétique réaliste. C'est-à-dire assez proche de l'image radar brute pour que la sélection des points homologues ne soit pas trop difficile. Ils seront recherchés principalement sur les lignes de crêtes, où des transitions nettes apparaissent. Pour notre étude, le modèle simple retenu est le suivant:

$$\{\sigma'_{ik}\} = F(\alpha_{local}) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

avec α_{local} l'angle d'incidence local au point (x,y) considéré.

D'autres modèles auraient conduits à des valeurs radiométriques différentes mais n'auraient pas apporté de précision significative en ce qui concerne l'étape de mise en correspondance. La considération de surfaces lambertiennes constitue un modèle simple de rétrodiffusion, amplement suffisant dans le cadre de notre étude.

Ce modèle a l'avantage d'être facilement maîtrisable. Les mesures sont estimées dans un premier temps sur une grille de pas constant (pas d'échantillonnage du MNT), où y_k représente la position géographique sur le terrain repérée par rapport à un ellipsoïde de référence, de sorte que Δy représente la résolution spatiale du MNT d'origine, soit (Fig. 5.1) :

$$\Delta y = y_k - y_{k-1} = \text{pas}_{MNT} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Pour finaliser la construction de l'image synthétique, il ne reste plus qu'à répartir l'ensemble des mesures $\{\sigma'_{jk}\}$ simulées sur une grille irrégulière, pour faire directement le lien entre l'ensemble des mesures originales $\{\sigma_{ij}\}$, et l'ensemble des mesures simulées $\{\sigma'_{jk}\}$.

En tenant compte de l'image des ambiguïtés, on va construire la grille irrégulière dans laquelle sera représentée l'image synthétique. Pour cela nous devons faire appel à des techniques de ré-échantillonnage. Les problèmes rencontrés s'expliquent par le fait que les pixels ne sont pas de la même taille (en terme de surface interceptée au sol). Le passage d'un échantillonnage régulier vers un échantillonnage irrégulier ou vice versa pose des problèmes non triviaux.

La grille de représentation des images brutes est directement liée, comme nous avons pu le voir dans le second chapitre, au processus d'acquisition des images. Le fonctionnement des instruments définit le pas d'échantillonnage en ligne et en colonne. Modifier cette distribution de l'information revient à appliquer des méthodes de ré-échantillonnage qui dégradent la qualité des images. Le souci de préserver au mieux la qualité et la quantité d'information recelées par les données originales, nous a amené à développer une nouvelle méthode de ré-échantillonnage.

5.3.3 Ré-échantillonnage - Maillage irrégulier

L'illumination du MNT permet d'obtenir outre la cartographie des zones d'ambiguïtés, la connaissance de la distribution spatiale de l'information. Une loi de distribution est estimée ; grâce à l'analyse de la partie de sol interceptée par une cellule radar, on peut évaluer la portion de sol couverte par chaque pixel de l'image synthétique.

Nous avons créé une grille intermédiaire appelée pseudo-grille de résolution très fine. Cette grille est liée au repère du satellite. Sa résolution a été adaptée pour limiter les problèmes aux limites inter pixel, et perdre le moins possible d'information lors de la redistribution. Le passage par la pseudo-grille constitue un sur-échantillonnage. La figure 5.1 illustre la démarche suivie.

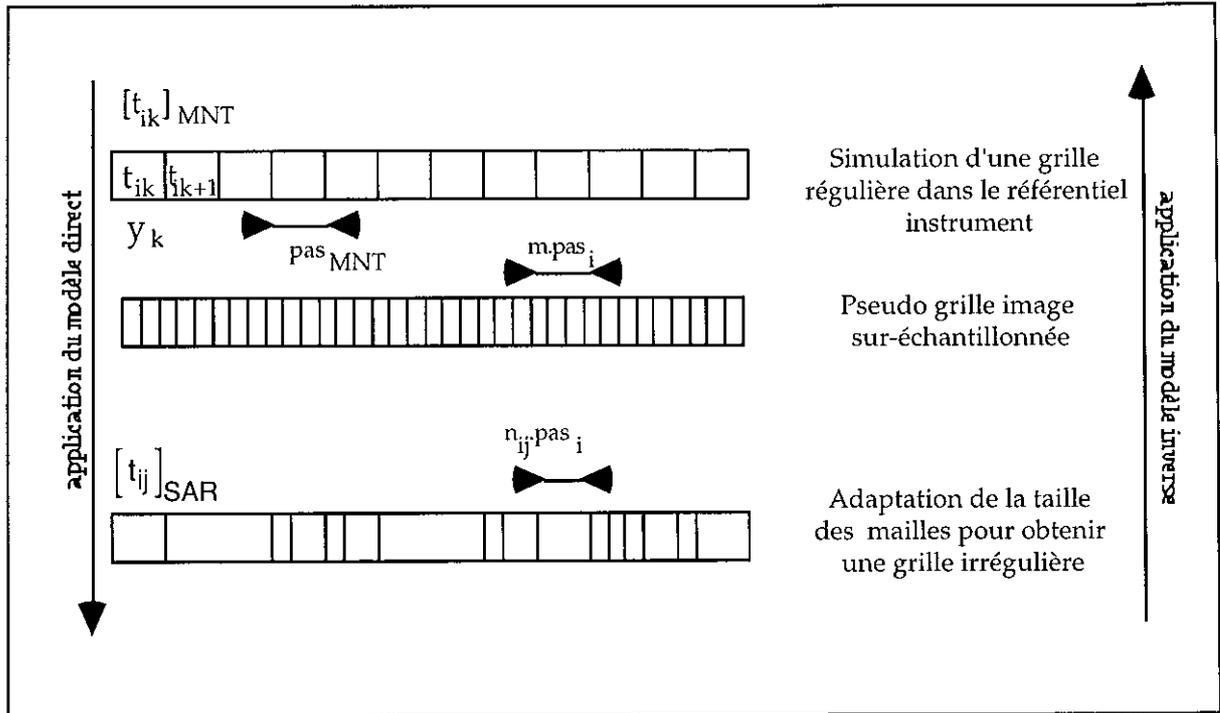


Figure 5.1 - méthode d'interpolation sur grille irrégulière

Soit y_k , un pixel de taille t_{ik} , positionné à la ligne i et à la colonne k sur la grille de représentation du MNT :

$$[t_{ik}]_{MNT} = pas_{MNT} = m \cdot pas_i \tag{Eq. 5.5}$$

m étant le nombre de cellules élémentaires de taille pas_i contenues dans $[t_{ik}]_{MNT}$, et pas_i le pas d'échantillonnage choisi pour la pseudo grille.

Partant d'une grille régulière le sur-échantillonnage est simple à réaliser.

A partir de la pseudo-grille, une grille à mailles irrégulières : $[t_{ij}]_{SAR}$ est créée. De façon générale, cette méthode consiste, pour obtenir la représentation dans la nouvelle grille, à associer un nombre entier de cellules élémentaires de la pseudo-grille afin de constituer un pixel de taille compatible avec la dimension de la maille de la nouvelle grille de représentation.

Soit la maille j de taille t_{ij} , pour une ligne i :

$$[t_{ij}]_{\text{SAR}} = n_{ij} \cdot \text{pas}_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Cette fois-ci n_{ij} correspond au nombre de cellules élémentaires qu'il faut associer pour former $[t_{ij}]_{\text{SAR}}$; et ε_{ij} représente l'erreur commise due au biais des tailles. Sur la pseudo grille sur la globalité d'une ligne (sur la largeur d'une fauchée), on peut écrire :

$$T_i = \sum_j t_{ij} = \sum_j (n_{ij} \cdot \text{pas}_i + \varepsilon_{ij}) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

avec T_i , la longueur de la ligne i considérée.

Il importe que la somme : $\sum_j \varepsilon_{ij}$ soit minimum. Le pas : pas_i est adapté pour chaque ligne pour avoir le minimum de pertes aux frontières. Plus le relief est accidenté et plus pas_i sera fin. Lorsque les irrégularités diminuent (zone de plaine), alors pas_i est proche de la résolution spatiale de l'image brute.

Lors de l'application du modèle direct où il s'agit de passer d'une grille régulière vers une grille irrégulière, la valeur de m est une constante. Cette valeur définit le pas de sur-échantillonnage qui autorise la formation de la pseudo grille. m est choisi en fonction de la distribution de la taille des mailles sur la grille irrégulière. A partir de l'image des ambiguïtés, cette distribution est étudiée et caractérisée par des paramètres statistiques. Pour différentes valeurs de m , la perte d'information globale sur une ligne correspondante au terme $\sum_j \varepsilon_{ij}$ est quantifiée. La moyenne et l'écart type de cette valeur sont calculés. S'il est possible de donner un ordre de grandeur pour la moyenne qui est souvent comprise entre 0.25 et 0.3, il n'en va pas de même avec l'écart type qui traduit l'irrégularité de cette distribution, et par la même l'irrégularité du sol observée. Le fait qu'on se soit intéressé à un relief très accidenté en est la cause. La valeur de m qui minimise cette somme des ε_{ij} , est alors conservée pour réaliser le sur-échantillonnage et ainsi créer la pseudo grille. Il existe une valeur minimum qu'il est inutile de dépasser. Elle est déduite à partir de la résolution géométrique et radiométrique (valeur du rapport signal sur bruit de l'instrument imageur), qui détermine l'information minimum qu'il est possible d'extraire à partir d'une mesure. Un autre facteur de limitation, la taille mémoire nécessaire pour traiter chaque ligne ainsi sur-échantillonnée, mais également le temps supplémentaire dû au traitement d'un plus grand nombre de pixels. La taille élémentaire des pixels de la pseudo grille a été fixée à un mètre pour traiter les images radar qui seront montrées dans l'avant dernier chapitre.

Lorsque nous effectuons le découpage de chaque maille d'une grille en cellules élémentaires appartenant à la pseudo-grille (sur-échantillonnage), nous avons différentes possibilités de

répartir la mesure $\{\sigma'_{ik}\}$. Nous avons choisi une manière simple qui consiste à appliquer un modèle d'équipartition. Dans ce cas il suffit d'éclater la mesure en quantité égale sur un nombre de cellules élémentaires déterminé par la taille du pixel (Fig. 5.2).

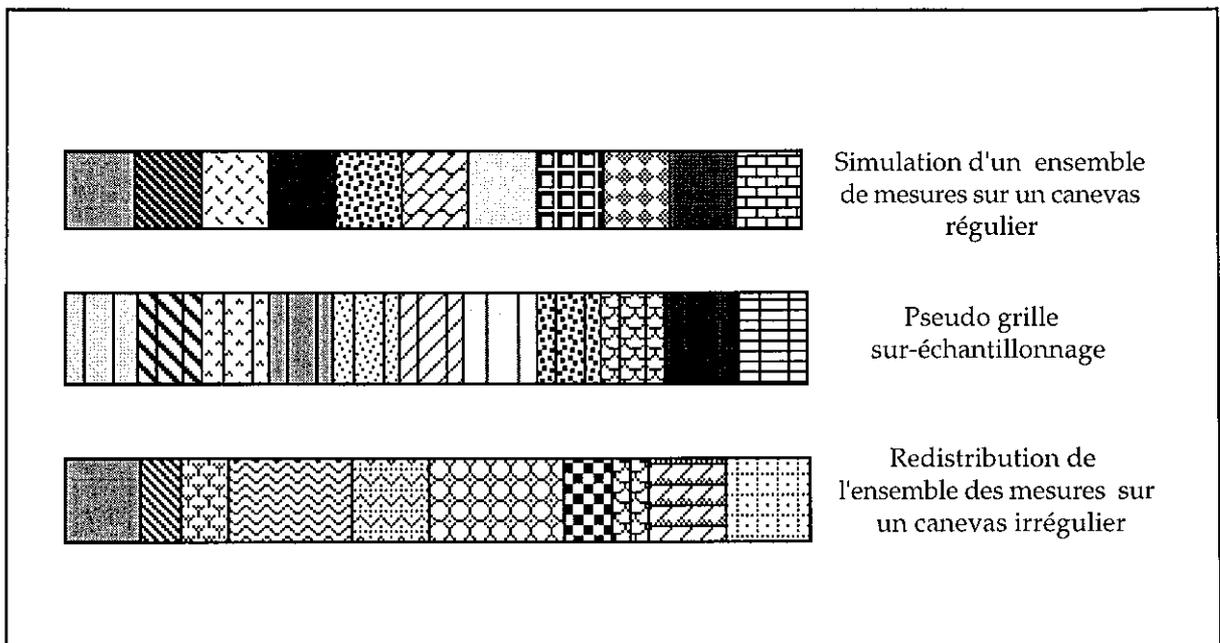


Figure 5.2 - distribution des mesures $\{\sigma'\}$ sur un canevas irrégulier

Comme il s'agit ici de construire une image synthétique pour tenir le rôle d'image de référence, cette loi de distribution est suffisante. Par contre différentes lois de distribution seront examinées dans le chapitre suivant lors de la discussion sur l'application du modèle inverse. Celui-ci consistera à passer d'un échantillonnage irrégulier vers un échantillonnage régulier.

La perte d'information est liée à deux phénomènes. D'une part à la représentation discrète de l'information qui ne permet pas de respecter la taille propre de chaque pixel de manière exacte même si la taille du pixel de la pseudo grille contribue à minimiser ces pertes. D'autre part à la contribution inégale des objets éclairés qu'il est difficile de modéliser. De sérieux problèmes se posent lors de l'éclatement de la valeur radiométrique de chaque pixel.

5.4 VRAISEMBLANCE DE L'IMAGE SYNTHETIQUE : DETECTION DE POINTS HOMOLOGUES

La simplicité du modèle radiométrique utilisé pour créer cette image synthétique ne nous permet pas d'avoir des informations autres que celles provoquées par des variations de l'orographie. En zone montagneuse les structures artificielles sont rares, très souvent les fonds de vallée encaissés sont masqués par le relief. Aussi on s'intéresse aux accidents de relief, et aux lignes de crêtes qui sont privilégiées car elles offrent de bons repères. Une vue générale de l'image sera toujours préférée, car l'interprétation des différents cas d'imagerie est plus facile s'il on considère le contexte. Chaque massif montagneux sera étudié l'un après l'autre pour favoriser l'interprétation locale des singularités. Une carte topographique est d'un grand secours, car elle permet de suivre l'enchaînement des contreforts et des vallées. Cependant une certaine éducation visuelle est nécessaire quant à l'interprétation pour faire le lien entre la projection cartographique et l'image brute radar. Les points d'appui sont sélectionnés de façon manuelle car l'image synthétique n'est pas assez proche (modèle radiométrique simple) pour utiliser un processus de sélection automatique de ces derniers. Cette tâche manuelle, souvent très laborieuse augmente les coûts des études car elle augmente considérablement le temps de traitement. Les dissemblances entre l'image radar simulée et l'image brute radar repose sur : la qualité des modèles radiométrique, et géométrique. Le premier dépend de la modélisations de l'ensemble des mesures (σ) en fonction de l'angle d'incidence. Quant au deuxième, outre la méconnaissance des paramètres géométriques de prise de vue, il est tributaire de la qualité du MNT.

Pour certaines zones de relief plus modéré (large vallée), les variations de relief ne sont plus assez fortes pour créer des signatures intéressantes : des transitions, les points d'appui sont alors rares. Pour pallier à ce problème il est alors possible de marier à l'information orographique une information thématique pour obtenir une image synthétique proche de l'image brute. Cette solution peut être appliquée de deux manières différentes.

Soit par l'application d'un modèle plus fin mais très complexe, pour construire l'ensemble des $\{\sigma'_{ik}\}$ (Armand, 1993). Cette tâche risque d'être longue et très coûteuse par rapport à l'utilisation à laquelle est destinée l'image synthétique. En effet il s'agit de paramétrer les caractéristiques des objets qui pourront servir d'amers éventuels. Comme la nature même de la mesure issue de chacun d'eux varie en fonction de ces caractéristiques (leur constitution, leur position, leur situation, dans le temps et dans l'espace) cette étape est très complexe.

Une autre solution, bien plus rapide consiste à combiner sur l'image synthétique, obtenue à partir d'un MNT, une information thématique issue d'une carte IGN ou d'une image optique (on

s'intéresse aux objets tels que les routes, les structures artificielles, ...). Si on dispose de ces sources d'information extérieures, et si elles sont représentées dans le même référentiel que celui du MNT de départ, il suffit alors d'appliquer la même déformation sur ces sources, que celles appliquées sur le MNT de départ. L'image de référence est issue de la simulation d'une prise de vue SAR au dessus d'un MNT sur laquelle seront incrustés des détails supplémentaires pour faciliter la recherche de points d'appui. Cette nouvelle image intègre ainsi à la fois des détails orographiques et thématiques améliorant la ressemblance entre l'image de synthèse et l'image radar brute. Ce qui revient à procéder à une opération de fusion par incorporation. De plus les méthodes de recherche automatique de points d'appui qui utilisent des processus de corrélation appliqués sur l'image de référence et l'image à rectifier pourraient être améliorées par cette intervention externe. L'incorporation d'objets choisis pourrait faciliter la mise en oeuvre de telles méthodes et améliorer leur performance. En effet des objets faciles à identifier seraient détectés plus rapidement et avec une meilleure précision.

La similitude entre l'image de référence et l'image SAR brute dépend certes du terrain imagé, mais aussi de la fidélité à reproduire celui-ci. Cette similitude est non seulement liée à la base de connaissance dont on dispose sur le terrain imagé (à la justesse de celle-ci), mais aussi à la connaissance des paramètres géométriques de prise de vue. Nous allons aborder maintenant ces deux points.

5.5 QUALITE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE PRISE DE VUE

En ce qui concerne les images issues du SAR embarqué sur le satellite ERS, exploitées dans ces travaux, les valeurs nominales des paramètres géométriques de prises de vue ont été considérées. L'influence du trajet atmosphérique a été négligée, les corrections liées à l'attitude du satellite sont déjà effectuées sur les images fournies, seules persistent les erreurs d'orbitographie et les erreurs instrument. La navigation de l'image synthétique par rapport à l'image brute montre que les erreurs d'orbitographie sont minimales, quant aux erreurs instrument (horloge) elles seront résolues par l'application du second modèle. Ces erreurs restent minimales comparées à celles engendrées par le MNT.

5.6 QUALITE DU MNT

Le MNT constitue une pièce maîtresse lorsqu'on désire modifier l'espace de représentation d'une image SAR en réalisant une projection dans un référentiel autre que le référentiel instrument

(Dowman, 1992). Le MNT est sollicité de façons différentes aussi la qualité de sa contribution sera fonction de l'information qui sera recherchée. Les différents critères utilisés pour discuter de la qualité d'un MNT sont résumées sur la figure 5.3.

La construction du modèle de déformation fait appel au MNT pour le calcul des parallaxes. La précision géométrique de ce modèle repose alors sur la qualité altimétrique absolue du MNT. A partir de l'application de ce modèle, une image synthétique SAR sera déduite. N'oublions pas que cette dernière a pour fonction de servir d'image de référence pour sélectionner des points d'appui. Or la recherche des points homologues entre cette image synthétique et l'image brute repose sur leur similitude, soit sur la représentation fidèle des formes sur l'image synthétique telles qu'elles apparaissent sur l'image radar brute. Cette fidélité dépend certes de la résolution spatiale du MNT mais aussi dépend fortement de la précision des dérivées (pentes), aussi on sera très attaché à la précision altimétrique relative du MNT. De manière pratique, les MNT dont on dispose aujourd'hui sont loin de satisfaire à ces exigences, différentes raisons en sont la causes.

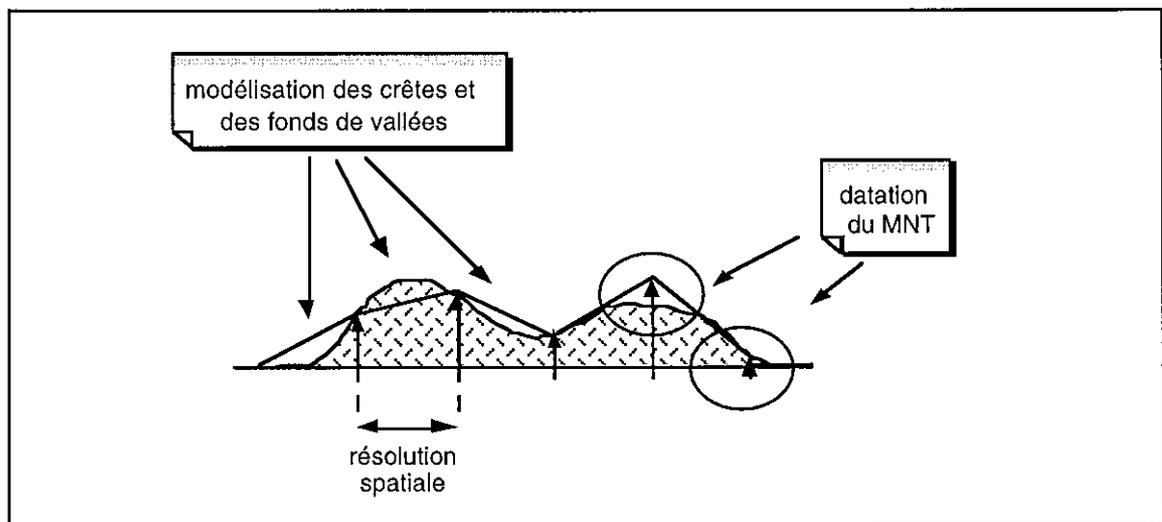


Figure 5.3 - Estimation de la qualité du MNT

La résolution spatiale du MNT : nous avons souvent affaire à des MNT échantillonnés à trente ou quarante mètres dans le meilleur des cas. Le problème rencontré face à cette limite de connaissance est surtout marqué lorsque l'on étudie une portion de sol dont la topographie est très accidentée (variation orographique $<$ résolution spatiale du MNT). En effet certains détails (lignes

de crêtes) sont facilement identifiés sur une image radar synthétique, mais leur position n'est pas toujours exacte, car elle est liée à la méthode d'obtention du MNT (qualité de l'interpolateur, ...).

Une autre remarque mérite d'être faite à propos de la forme de la grille sur laquelle est représentée le MNT, et plus particulièrement sur les dimension de la maille. En effet nous avons presque toujours affaire à une maille de dimension carrée. Comme le montre la figure 5.3, cette régularité n'est pas toujours adaptée aux irrégularités de terrain. Cette remarque est non seulement vrai pour la représentation du relief mais reste aussi valable pour la représentation d'autres grandeurs physiques. Certains travaux portent d'ailleurs sur le développement de processus d'échantillonnage mieux adaptés en proposant un maillage triangulaire (Van den Berghe, 1992).

A ceci, il faut également associer la résolution radiométrique du MNT. Actuellement les MNTs dont on dispose sont construits soit à l'aide d'une numérisation manuelle des courbes de niveaux à partir de cartes topographique de l'Institut Géographique National, soit à l'aide d'un couple d'images stéréo-optique par exemple (ou par application du principe de l'interférométrie bientôt). Dans le premier cas, il y a interpolation entre les courbes, dans le deuxième, il y a un effet de lissage selon les différentes opérations. La précision altimétrique résultante dépend donc de la manière d'obtention et de son appropriation au terrain (Polidori, 1995). Nous avons vu dans le second chapitre, les conséquences que peut avoir une erreur sur l'altitude du point visé, sur sa position dans le plan image. La précision du géocodage repose fortement sur la qualité du MNT utilisé. Le tableau suivant (Tab. 5.1) regroupe pour plusieurs capteurs embarqués, l'erreur minimum suffisante sur l'altitude h du point considéré pour produire un déplacement d'un pixel (Wong *et al.*, 1981). Nous avons rajouté une ligne à ce tableau concernant les caractéristiques de ERS-1.

Capteur	Altitude	Θ (Angle de visée)	Résolution spatiale	Valeur de h pour le déplacement de 1 pixel
MSS (Landsat-1à3)	920 km	5,78°	79 m	690 m
TM (Landsat-4-5)	705 km	7,47°	30 m	230 m
MLA (SPOT)	822 km	2,12°	20 m	500 m
Panchromatic LA (SPOT)	822 km	28,12°	15 m	22 m
SAR (Seasat)	822 km	20°	25 m	9 m
SAR - format PRI (ERS-1)	785 km	23°	33 m	14 m

Tableau 5.1 - Précision altimétrique requise pour un géocodage sub-pixel
(d'après Wong *et al.*, 1981)

Les parties grisées du tableau correspondent aux capteurs considérés dans ces travaux.

En terme de localisation, un écart de un pixel est provoqué par une information erronée sur l'altitude du point considéré, donnée en dernière colonne. Ainsi pour le SAR embarqué sur ERS-1 les caractéristiques sont les suivantes : une erreur de positionnement de un pixel (30 mètres) est induite par une erreur sur h de l'ordre de 14 mètres. Ce qui demande une résolution altimétrique très fine.

Cette erreur commise sur la localisation est certes due à une mauvaise modélisation de l'orographie du terrain. Mais elle est, de plus, influencée par les paramètres instrumentaux tels que l'angle de visée et la résolution spatiale. Cette influence aura d'autant plus de conséquences que la visée est oblique et que la résolution de l'instrument est fine.

Ainsi la définition du MNT (ses qualités en terme de résolution spatiale et résolution altimétrique) est primordiale pour la démarche suivie dans cette étude. Si l'on considère les images acquises par les futurs instruments, des images de résolution métrique seront alors disponibles, l'intégration des caractéristiques de telles images nous amène à une erreur minimum sur h de l'ordre du mètre. Or les MNT générés par des méthodes de stéréovision optique (couple stéréoscopique SPOT) ne répondent pas encore à une telle exigence (précision atteinte est de l'ordre de la dizaine de

mètres). La création de ces MNT est très coûteuse et l'utilisation de l'imagerie optique fait que toutes les régions du globe terrestre ne sont pas disponibles. Les motivations, pour l'utilisation des techniques d'interférométrie, sont renforcées par de telles constatations.

Il faut également dire un mot sur l'âge du MNT qui est utilisé, même si cette remarque semble évidente. Il est souvent très difficile de disposer de données récentes sur le site étudié. Et pourtant, tout changement topographique aura une grande importance, puisque lorsqu'il s'agira de sélectionner des points homologues entre les deux images (l'image synthétique radar et l'image radar originale), il faudra que celles-ci soient les plus proches possible. Nous venons de voir que toute confusion peut amener de graves incidences sur le modèle de déformation géométrique. Elles pénalisent la mise en correspondance des images, sans que ce soit nécessairement discernable par l'opérateur.

5.7 CONCLUSION

A l'issue de l'opération de simulation on dispose d'une image synthétique radar. Comme cette image est issue d'un MNT représenté dans un référentiel terrestre orthogonal, il est possible par l'étude de l'historique des transformations qu'elle a subies de retrouver son expression dans cet ancien référentiel. Son obtention liée à la simulation d'un capteur actif latéral offre des caractères suffisamment semblables à l'image brute SAR, pour servir d'image de référence.

Le modèle géométrique qui a été construit réalise le passage du référentiel orthogonal terrestre au repère du satellite. L'utilisation de son inverse permet alors de transférer une image du référentiel du satellite vers un référentiel terrestre orthogonal. La construction de cette image de référence prend alors beaucoup d'importance. A partir du modèle inverse appliqué sur l'image radar originale, une ortho-image radar pourra être construite.

Nous allons aborder maintenant un autre volet de cette dernière partie concernant la fusion au niveau du pixel. Il s'agit de décrire la chaîne de traitement complète que nous avons élaborée et qui réalise la construction d'une ortho-image radar.

Chapitre 6

CONSTRUCTION D'UNE ORTHO-IMAGE RADAR

Ce chapitre est consacré à la description de la chaîne de traitement complète, construite pour fabriquer des ortho-images radar. Elle est constituée d'un simulateur SAR à partir duquel sont déduits des modèles numériques. Leur application conduit à une ortho-image SAR. En ce qui concerne la première phase de traitement, elle aboutit à une image synthétique. Cette partie a été discutée dans le chapitre précédent. Nous détaillerons ici la dernière phase de traitement qui porte sur l'application d'une méthode de ré-échantillonnage particulière. Nous aborderons alors les problèmes liés aux corrections radiométriques et aux méthodes d'interpolation. Pour résoudre les problèmes liés à l'irrégularité de l'échantillonnage, la même démarche que celle expliquée dans le chapitre précédent a été suivie. A ceci près qu'ici, comme nous avons à redistribuer sur un nouveau canevas des mesures réelles (dynamique spectrale étendue), nous avons pris soin de rechercher une loi de distribution plus adaptée aux nombreux problèmes interpixels. La qualité de l'ortho-image obtenue sera analysée à partir de la précision atteinte au niveau de la géolocalisation des objets qui composent la scène, mais aussi à partir de la richesse d'informations (ou attributs : forme, position, réponse spectrale) que l'on pourra extraire d'une telle image.

La chaîne de traitement qui a été construite, est représentée dans son intégralité dans le schéma ci-dessous (Fig. 6.1). Pour plus de clarté, elle est présentée de façon générale. Par la suite les différentes phases du traitement sont expliquées les unes après les autres.

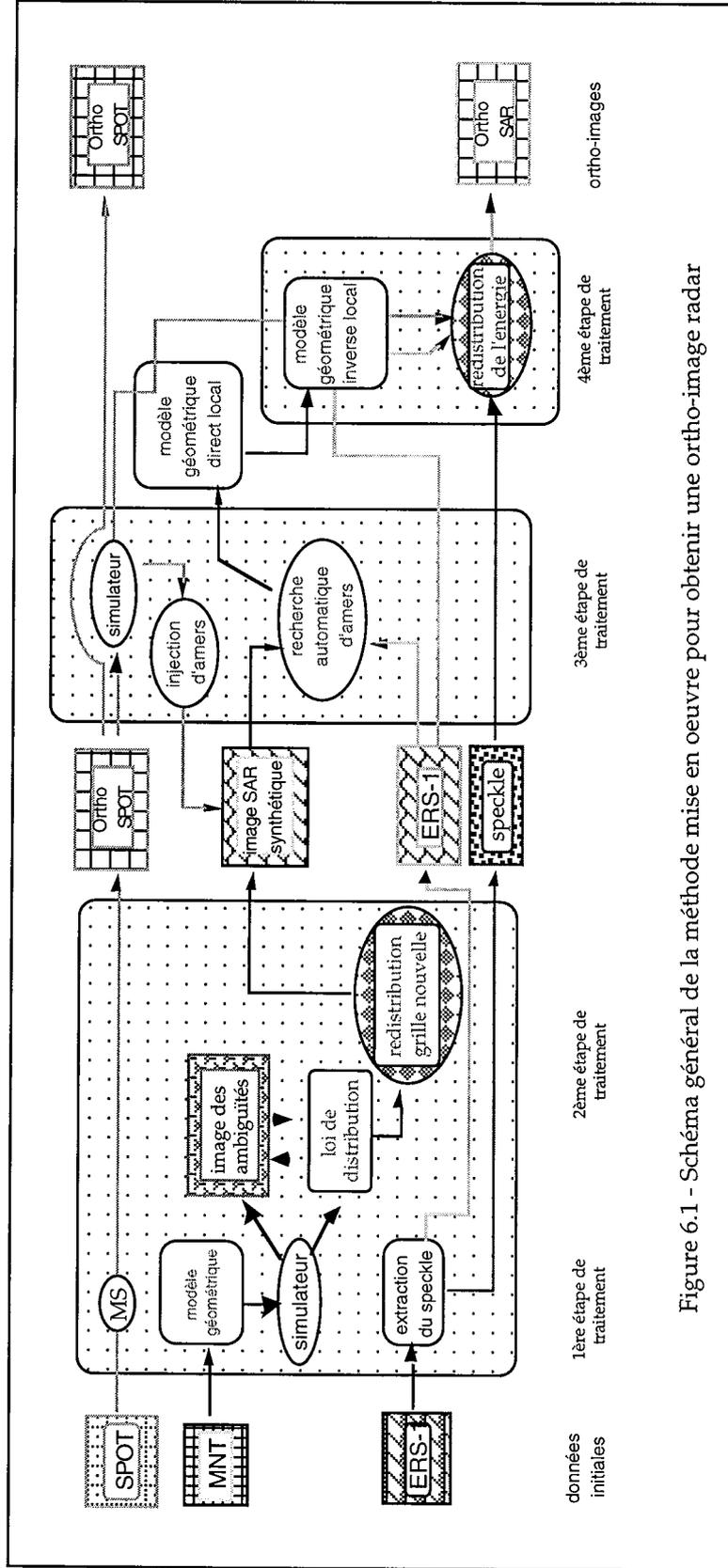


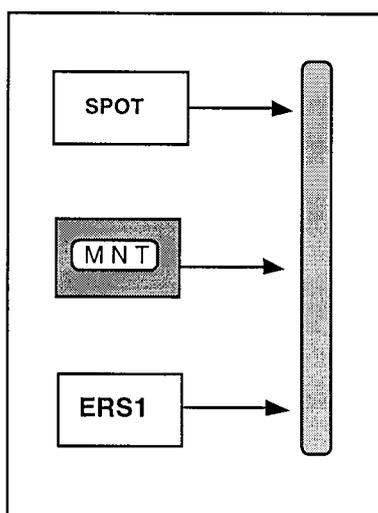
Figure 6.1 - Schéma général de la méthode mise en oeuvre pour obtenir une ortho-image radar

* MS : méthode standard

6.1 SCHEMA GENERAL DE LA METHODE

Le principe de la méthode est décomposé en 4 étapes de traitement. La première et la deuxième étape réalisent la simulation d'un capteur tel que le SAR. Elles permettent d'obtenir une image synthétique SAR par l'application de deux fonctions f et g décrites dans le second chapitre. Des modèles géométrique et radiométrique ont été employés. Dans une première étape la grille de représentation dans laquelle sera exprimée l'image synthétique est calculée. Puis dans une seconde étape, l'application d'une méthode de ré-échantillonnage réalise la distribution de mesures synthétiques sur cette nouvelle grille. Une nouvelle méthode de ré-échantillonnage est proposée pour mieux gérer les irrégularités de la grille (cf. chapitre 5). La troisième étape permet d'affiner la superposition entre l'image synthétique issue des étapes 1 et 2 avec l'image SAR brute correspondante. Cette étape comprend la prise d'amers manuelle et l'insertion d'amers provenant de sources externes. A l'issue de cette étape un dernier modèle géométrique est déduit, il est formalisé par la fonction f' décrite dans le second chapitre. Les fonctions f , g , et f' étant inversibles, l'application de leur inverse sur l'image brute SAR constitue la dernière étape, et fournit une ortho-image SAR.

Cette manière schématique de présenter notre objectif permet de fixer tout de suite le cadre dans lequel nous avons travaillé. Nous disposons en entrée bien sûr, des données originales comportant une image brute optique et une image brute radar. De plus nous avons également besoin d'un modèle numérique de terrain (MNT).



Même si cette méthode demanderait parfois des propriétés supérieures (résolution spatiale et altimétrique du MNT, résolution spatiale de l'image optique) à celles que l'on est à même de disposer aujourd'hui, elle ouvre la voie à une nouvelle approche dans le traitement des données.

L'approche multicapteur que nous avons voulu promouvoir ici, consiste à utiliser un procédé de fusion comme un outil pour le conditionnement des données, préalable à un autre processus de fusion.

Figure 6.2 - Les données initiales

6.2 LES DONNEES INITIALES (Fig. 6.2)

L'image optique est issue du capteur embarqué sur la plate-forme SPOT. Nous avons disposé d'une image dont la configuration de prise de vue est une visée au Nadir, ce qui simplifie les traitements appliqués sur l'image optique, et nous a ainsi permis de nous consacrer au traitement de l'image radar. L'utilisation de visées latérales ne constituerait pas un problème en soi, et pourrait même être un atout, avec des angles de visée adaptés les images optique et radar présentent une certaine ressemblance, accrue si les angles sont choisis complémentaires. Mais le temps accordé aux traitements appliqués sur l'image optique serait plus conséquent, cette prise en compte pourrait faire partie des recherches à venir, dédiées à ce processus pour l'approfondir et l'améliorer.

Il est important d'enquêter sur le MNT et sur la façon dont il a été fabriqué. Il est nécessaire de connaître outre la résolution spatiale et la résolution altimétrique, l'incertitude sur ces valeurs. La qualité du géocodage repose sur les caractéristiques du MNT. Une analyse préliminaire détaillée de celui-ci permet d'avoir un aperçu sur les qualités intrinsèques de l'ortho-image construite en final.

En ce qui concerne l'image radar, les configurations de prise de vue suivant une acquisition en phase ascendante ou descendante de l'orbite ont été dissociées. Le fonctionnement de l'instrument est tel que l'axe de visée est toujours situé à droite par rapport au sens de parcours de l'orbite (quelque soit la phase de l'orbite : ascendante ou descendante). Comme les diverses configurations géométriques engendrent des défauts conséquents, il est facile de prévoir ô combien deux acquisitions d'une même scène, l'une en phase ascendante et l'autre en phase descendante sont différentes. En ce qui concerne l'aspect géométrique de la surface imagée, il est facile de se rendre compte des différences des deux types d'acquisition, illustrées sur la figure 6.3. Lorsqu'on s'intéresse à l'étude de la répartition spatiale d'un objet, on pourrait penser que la prise en compte de l'image ascendante et descendante d'une même scène constituerait un avantage. Cette association vise bien sûr à lever l'indécision sur la présence ou non de l'objet à cartographier lorsqu'un cas d'imagerie défavorable sur l'une ou l'autre image se produit. Cependant, même si l'on apprend à s'affranchir des effets produits par le relief, l'influence des conditions externes d'observation peut être non négligeable. Cette influence est bien sûr liée aux rapports existants entre les paramètres physiques descriptifs pour identifier l'objet d'intérêt et les conditions atmosphériques d'observations. Comme les acquisitions ascendante et descendante n'ont pas lieu au même instant de la journée, la surface au sol imagée n'est donc pas soumise aux mêmes conditions atmosphériques. Ce qui peut avoir une incidence sur le coefficient de rétrodiffusion ; cette remarque sera d'ailleurs approfondie dans le chapitre suivant réservé à une application où ces considérations sont importantes.

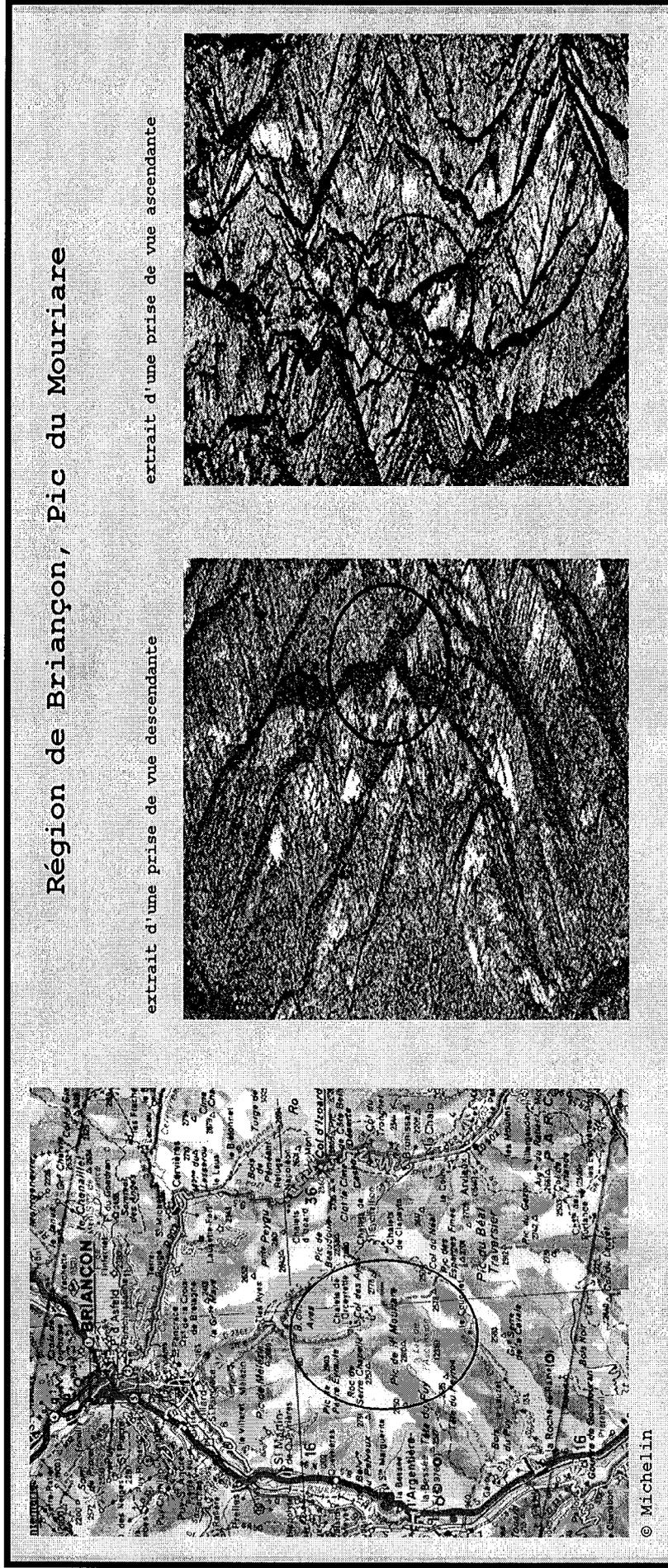
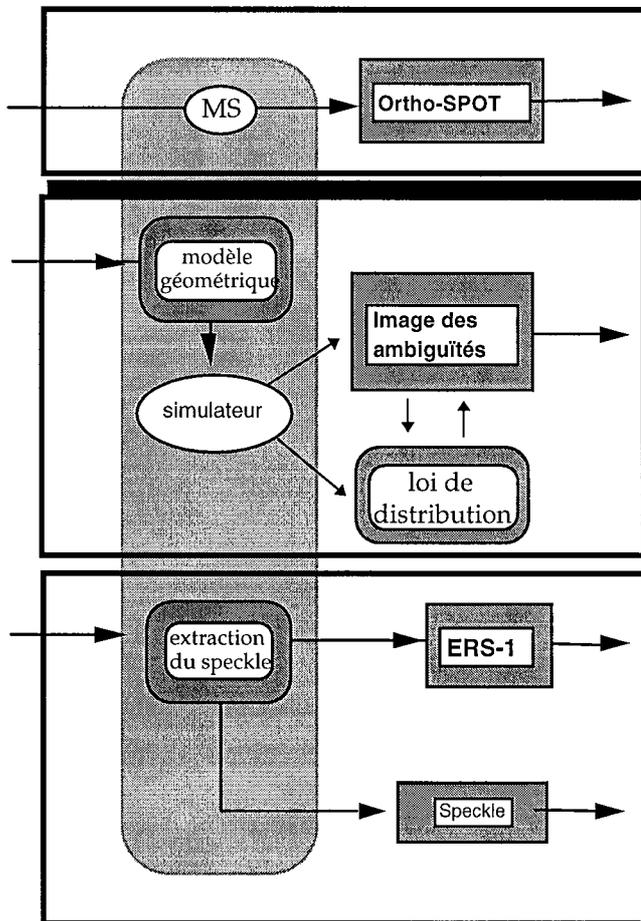


Figure 6.3 - Comparaison d'une même portion de Terre vue par différentes phases : descendante et ascendante

6.3 PRE-TRAITEMENTS

Nous avons associé dans la première partie, les pré-traitements que subissent l'image optique et l'image radar, avec la construction d'une image de référence (Fig. 6.4). Chaque support est encore traité séparément. De l'image optique, on essaiera par l'application de méthodes standards (décrites au chapitre 5) d'obtenir une ortho-image optique. Quant à l'image radar brute, on s'emploiera à la filtrer afin de lui ôter le speckle. Puis on cherchera à se doter d'une image de référence pour formaliser le changement de repère. La description de celle-ci a été donnée au chapitre précédent.



L'ortho-image optique est obtenue par l'application de méthodes standards (MS).

Nous avons modélisé l'enregistrement des mesures effectuées par un SAR en fonction des caractéristiques du relief. Nous abordons ici la description d'un module particulier de la chaîne de traitement : le **simulateur de prise de vue SAR**. Ce simulateur permet de créer une image appelée **image des ambiguïtés** ainsi qu'une loi de distribution de l'information propre au mode de fonctionnement du capteur (cf. chapitre 5).

Les images radars ont un aspect "poivre et sel" dû à la présence d'un effet que l'on appelle le speckle. Cet effet est généralement perçu comme un bruit que l'on essaiera d'éliminer grâce à une opération de filtrage.

* MS : méthode standard

Figure 6.4 - Conditionnement des données

6.3.1 Couverture spatiale de la région étudiée par le MNT

La manipulation du MNT demande de replacer celui-ci dans le référentiel de l'instrument. Le MNT correspond en général à un extrait de l'image radar brute. En le replaçant par rapport à l'acquisition faite par l'instrument on apprécie la similitude entre l'image réelle et l'image synthétique obtenue à partir du MNT. Cependant il est nécessaire d'étudier sur une carte topographique les parties qui encadrent le MNT. Il s'agit de repérer les échos qui ne pourraient pas être simulés à partir du MNT et pourtant qui sont visibles sur l'image brute. Ces échos sont dus soit à des retours en retard (provenant des points situés sur la bordure la plus proche du capteur), soit à des retours en avance (provenant des points situés sur la bordure la plus éloignée du capteur). L'avance ou le retard des échos est due à l'altitude des points interceptés (cf. chapitre 2). La figure 6.5 décrit pour un point donné, situé à l'altitude h et éloigné d'une distance y de la bordure du MNT, la présence ou non de son écho sur l'image brute. Pour exemple, un point placé :

à une altitude h supérieure ou égale à 900 mètres et,

à une distance de 2000 mètres de la bordure du MNT la plus proche du capteur,

bien que présent sur l'image brute, sera manquant sur l'image simulée.

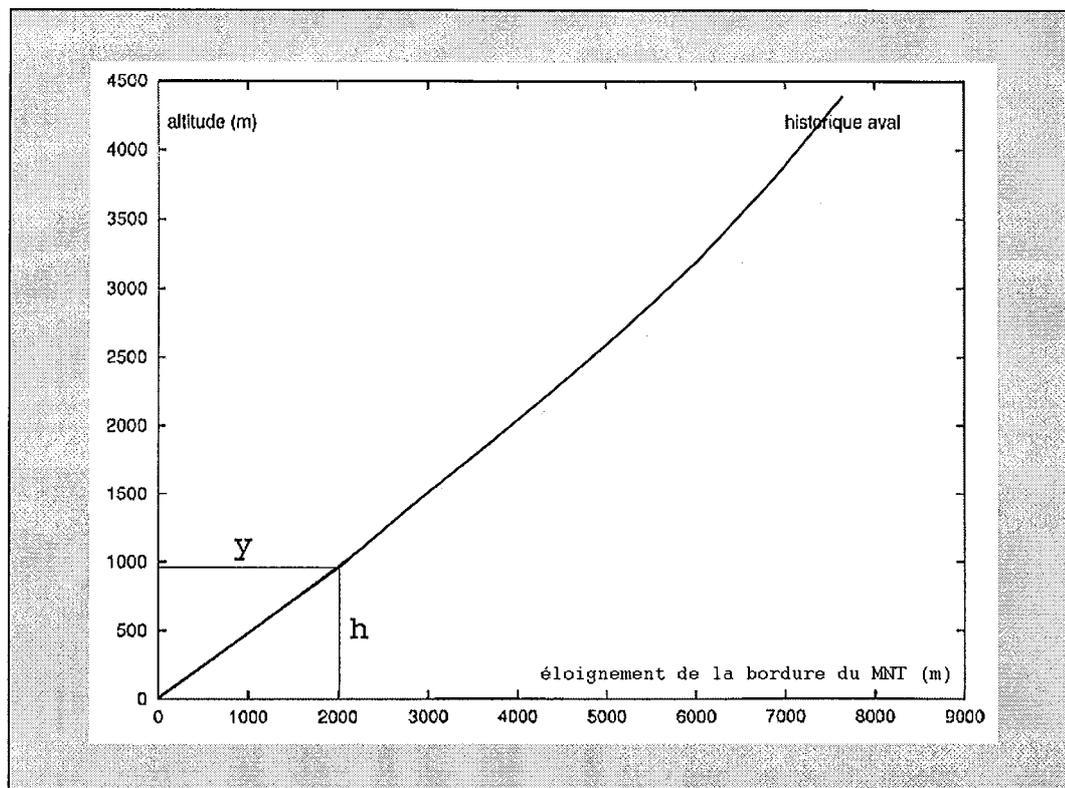


Figure 6.5 - Historique des réponses situées en bordure du MNT

Cette étude permet d'apprécier plus justement la ressemblance entre l'image SAR issue de la simulation et l'image SAR brute. Lorsqu'on étudie une région où le relief est très accidenté les bordures de l'image synthétique sont mal formées. Ainsi certaines crêtes ne seront pas totalement imagées. Ce qui demande une attention particulière lors de la prise d'amers pour ne pas créer de mauvais couples de points homologues qui induiraient le modèle en erreur. Cette remarque est importante car l'on sait que la précision de la mise en correspondance est directement liée à la répartition spatiale des amers. D'ordinaire on recherche les amers sur les bords de scène afin d'avoir un modèle plus robuste. Ici il faut prendre ses précautions, et s'attendre à des imperfections sur l'image synthétique. Une solution consisterait à prendre un modèle numérique de terrain suffisamment grand pour être sûr d'avoir une simulation la plus exacte possible. Mais il est rare de pouvoir disposer d'un MNT de qualité à sa convenance.

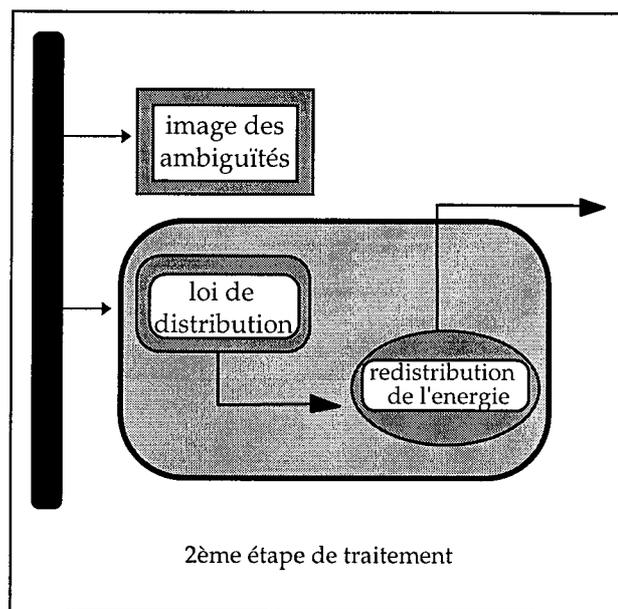
6.3.2 Filtrage du speckle

Il existe beaucoup de méthodes pour le filtrage du speckle. Le choix de l'une d'entre elles est fonction de l'application. On cherche avant tout à préserver la résolution de l'image en limitant la

perte d'information produite par l'application du filtre choisi (Pénicand *et al.*, 1995). Le speckle est perçu sur l'image comme un bruit qui gêne l'identification des zones homogènes mais aussi qui rend difficile l'analyse de la texture d'une surface considérée. Cependant il semble difficile de faire la part des contributions, sur la mesure du coefficient de rétrodiffusion σ , entre l'hétérogénéité due à la texture de la surface éclairée et le speckle en lui même. Nous avons choisi de filtrer le speckle et de le réserver car nous pourrions être amenés à considérer l'information qu'il contient lorsqu'on se préoccupera du problème lié à la redistribution de l'information. Cette approche n'a pu être concrètement expérimentée par manque de temps, mais la caractérisation d'un filtre étant liée à la quantification et à la qualification de l'information qu'il élimine montre l'intérêt de considérer le speckle comme une information et non plus comme un bruit. Comme nous l'avons évoqué, un grand nombre d'applications de fusion de pixel concerne la cartographie. La conservation des structures de l'image pour assurer une meilleure détection et une meilleure analyse des objets qui la composent est souvent le principal but recherché. Un exemple de filtrage sera donné dans le chapitre suivant.

6.3.3 Ré-échantillonnage sur maillage irrégulier

Le module faisant appel à un processus de ré-échantillonnage (ou redistribution de l'énergie) est sollicité à deux moments dans la chaîne de traitement. La première utilisation en est faite lors de la construction de l'image synthétique (Fig. 6.6). Le chapitre précédent détaille la méthode appliquée dans ce cadre. Elle décrit le passage d'une grille régulière vers une grille irrégulière avec une étape intermédiaire faisant appel à une pseudo grille correspondant au résultat d'un sur-échantillonnage. La méthode étant réversible, elle sera reprise une seconde fois pour la mise en œuvre du modèle inverse.



L'une des contraintes que nous avons imposées sur le choix d'une méthode de ré-échantillonnage est la réversibilité. Si celle-ci est vérifiée sur le plan géométrique, elle sert par contre de critère pour juger de la qualité d'une méthode de ré-échantillonnage sur le plan radiométrique.

La même méthode peut être appliquée aussi bien avec le modèle géométrique **direct** qu'avec le modèle géométrique **inverse** (dans ce cas il s'agira alors de passer de la grille irrégulière à une grille régulière).

Cette contrainte simplifie l'écriture et la maintenance de la chaîne de traitement, sans nuire à la qualité des résultats.

Figure 6.6 - Redistribution spatiale d'une information sur une grille irrégulière

6.4 MISE EN CORRESPONDANCE

Une superposition précise, c'est-à-dire au pixel près entre l'image de référence et l'image SAR brute est recherchée. Elle sera réalisée grâce à l'ajout d'une étape supplémentaire de mise en correspondance, pour parfaire l'écriture du modèle direct. Cette nouvelle phase consiste à sélectionner des points homologues entre l'image de référence : l'image synthétique radar, et l'image radar originale. Grâce à de nombreuses similitudes entre ces deux images, les amers sont identifiables. C'est une opération qui pour l'heure est effectuée manuellement par un opérateur.

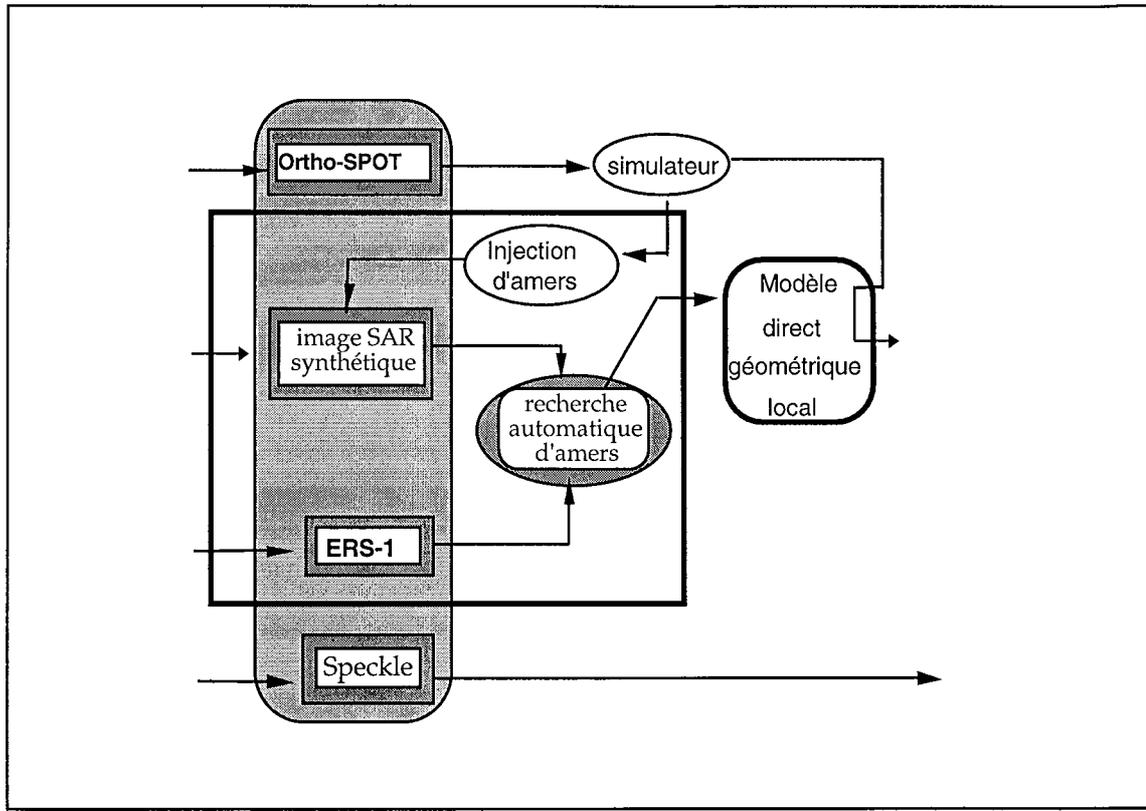


Figure 6.7 - Gestion des amers

La sélection des points d'appui, même rendue plus facile par la configuration adoptée pour l'image de référence, pourrait être encore optimisée par l'apport d'éléments extérieurs. Nous avons imaginé ici, de faire participer des éléments extraits de l'analyse de la scène optique. Comme nous disposons d'un simulateur de prise de vue radar, il est possible de calculer la position de certains objets aperçus et identifiés sur l'image optique, dans le référentiel de l'image de référence. Ensuite par une opération d'incrustation, ces objets sont apposés dans l'image de référence. La radiométrie optique est conservée. Ce qui a pour effet de rendre plus réaliste la vue synthétique donnée par le simulateur appliqué sur le MNT. Il ne faut pas oublier que le MNT renseigne seulement sur l'aspect morphologique du terrain. Ces objets sont bien sûr choisis en fonction de leur réponse spectrale, à la fois significative dans le domaine optique et dans le domaine des hyperfréquences pour offrir des points homoloques (Fig. 6.7), (Mangolini *et al.*, 1993).

Dans le cas où l'on se consacre à des zones de relief très accidenté, on a besoin d'un MNT pour déjouer tous les artefacts dus à la configuration de prise de vue et aux irrégularités de terrain. Mais dès qu'on a appris à s'affranchir des ambiguïtés formées sur l'image, on s'aperçoit que c'est sur de telles zones qu'une image de référence créée à partir du MNT est la plus fonctionnelle. Par contre,

sur des zones de relief plus modéré (les fonds de vallées) on ne dispose pas des mêmes atouts. Les rares transitions d'orographie (changements de pente) n'entraînent plus une variation significative de l'angle d'incidence local. Le modèle radiométrique n'est plus adapté. L'image synthétique manque de singularités qui pourraient servir de points d'appui. Parmi les solutions proposées, une consiste à choisir un modèle radiométrique plus complexe, une autre consiste à prendre en compte des informations externes. On sent bien ici tout le poids de l'apport de l'imagerie optique dans une telle configuration. Elle permet de donner plus de consistance à l'image synthétique, tout du moins au niveau des objets, qui la constituent, susceptibles de jouer le rôle de point d'appui. On conclut que l'importance de l'imagerie optique croît quand le relief décroît. L'ajout de ces éléments ponctuels, suivant leur caractéristique laisse présager une idée sous-jacente à savoir : la recherche automatique de points d'appui afin d'optimiser la chaîne de traitement mise en œuvre ici. L'aboutissement de cette voie reste aujourd'hui encore hypothétique. En effet l'aspect très bruité des images radar nous laisse encore perplexe quant à la réalisation d'une telle tâche.

Cette prise d'amers constitue les dernières modifications apportées au modèle de passage d'un référentiel à l'autre. La qualité géométrique d'une image est estimée grâce à l'évaluation de la qualité de localisation des pixels. La localisation des points en absolu est définie par rapport à la surface terrestre. En ce qui concerne l'imagerie radar, la stabilité de cette localisation est acquise et confirmée par de nombreux travaux (Renouard et Perlant, 1993). Nous avons pu d'ailleurs le vérifier également lors de nos expériences. En conséquence le nombre de points d'appui nécessaires se trouve restreint, une dizaine d'amers suffit pour naviguer une image. De plus, les premiers modèles (les fonctions f et g) qui prennent en compte la configuration de prise de vue permettent de générer une image synthétique très réaliste.

6.5 MODELE INVERSE

Le **modèle inverse de passage** se déduit aisément du modèle direct (Fig. 6.8). L'application de ce modèle inverse sur l'image brute nous offre une image radar ortho, et constitue la dernière étape du traitement. L'application du modèle inverse est bien sûr associée à un procédé de ré-échantillonnage.

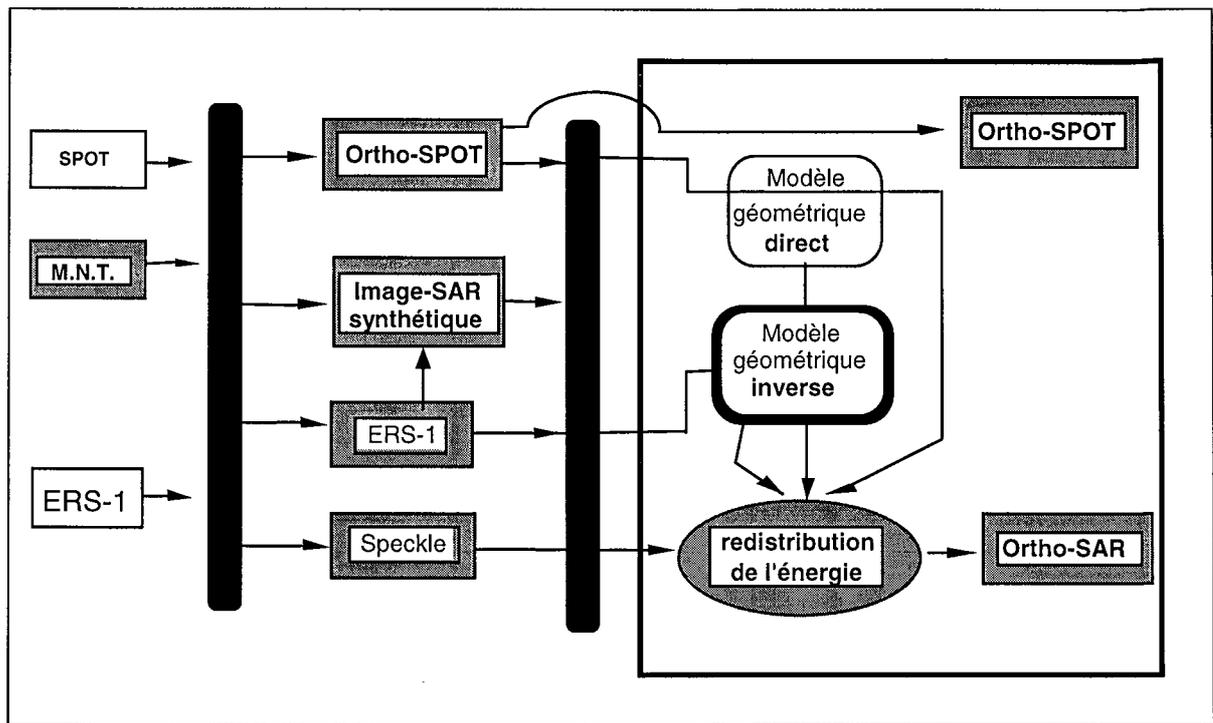


Figure 6.8 - Application du modèle inverse

6.5.1 Loi de distribution radiométrique

A partir d'un profil de terrain, l'acquisition d'une image SAR est simulée. Grâce à l'application du modèle géométrique direct, l'image du profil de terrain dans le repère instrument est réalisée. Les objets éclairés sont choisis, de sorte que la mesure du coefficient de rétrodiffusion soit connue. Cette image synthétique est exprimée dans le référentiel instrument et constitue le point de départ de nos expériences. Puis notre modèle géométrique inverse associé à un processus de ré-échantillonnage particulier (ou loi de redistribution de l'énergie) est appliqué sur cette image. Le résultat de cette étape sera la construction d'une ortho-image. Enfin, cette ortho-image sera comparée à une image témoin, le but étant d'éprouver le processus de ré-échantillonnage utilisé. Cette image témoin quant à elle, est directement déduite à partir de la connaissance du profil de terrain, et de la couverture thématique en exprimant cette fois-ci les mesures du coefficient de rétrodiffusion dans un référentiel terrestre orthogonal.

On cherche en appliquant différents processus de ré-échantillonnage à construire une ortho-image la plus proche possible de celle qui constitue l'image témoin. Différentes expériences ont pu être simulées grâce à l'adaptation de la loi de distribution. Ces dernières sont comparées sur un graphique. La distribution radiométrique des mesures (CN) a été tracée en fonction de la distribution spatiale (Y)

dans un référentiel terrestre orthogonal. La figure 6.9 regroupe la distribution témoin et la distribution SAR brute.

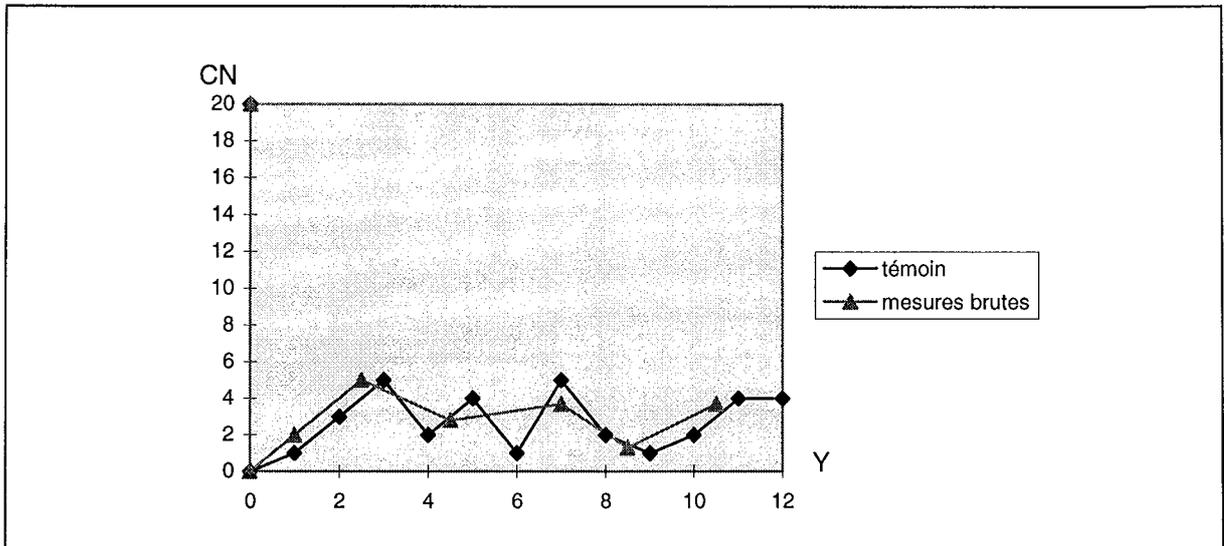


Figure 6.9 - Simulation d'un profil de mesures

Nous avons regroupé sur la figure 6.9 les deux distributions de départ : l'échantillon témoin (dont les mesures sont distribuées sur une grille régulière dans un référentiel orthonormé), et l'échantillon issu d'une simulation radar (dont les mesures sont distribués sur une grille irrégulière dans le référentiel instrument). L'application du modèle inverse sur la distribution des mesures brutes permet de ramener ces dernières dans un référentiel orthonormé, donc de les distribuer sur une grille régulière. On s'intéresse à cette nouvelle distribution et surtout à la modification de l'information qu'elle entraîne comparée à l'information contenue dans l'image témoin. La nouvelle distribution des mesures brutes obtenue, sera toujours comparée à la distribution témoin. La comparaison entre la distribution témoin et la distribution expérimentale nous permettra de juger de l'exactitude de la loi de ré-échantillonnage appliquée, et d'estimer l'information perdue au cours des transformations de changement de référentiel.

Parmi les méthodes mises en œuvre aujourd'hui deux se distinguent. Une des solutions appliquées, consiste à procéder à une équipartition. Ce qui revient à partager de façon égale la quantité d'énergie en fonction de la couverture spatiale de la maille. Une seconde solution consiste à dupliquer l'information, c'est-à-dire plutôt que de redistribuer comme précédemment l'information de manière équilibrée on préfère la garder intacte et la diluer ou la concentrer si besoin, en fonction de la taille de la maille. Même si cette solution convient mieux que la première aux dires des utilisateurs,

elle amène elle aussi, des imperfections difficiles à contourner. Sur la figure 6.10 ces deux expériences ont été regroupées.

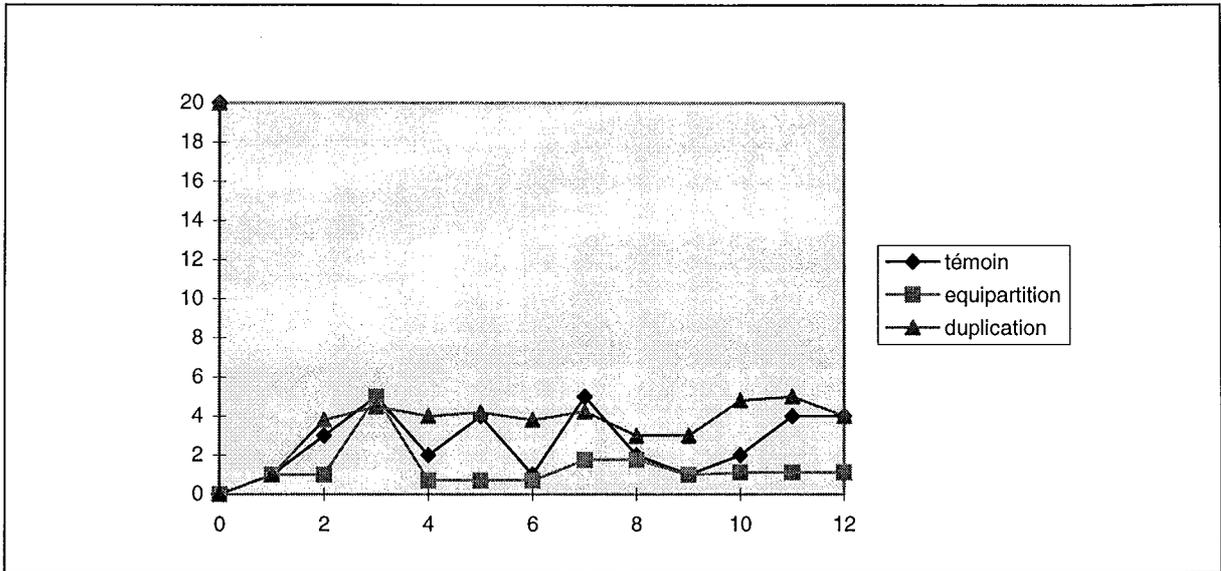


Figure 6.10 - Equipartition ou Duplication de l'énergie

La série 1 (témoin) représente la distribution réelle de l'information tandis que la série 2 (équipartition) montre la distribution qui a été obtenue par l'application d'une loi d'équipartition. Quant à la troisième série (duplication) elle représente la distribution qui a été obtenue par l'application d'une loi de duplication. Ces deux séries ne permettent pas de retrouver l'information telle qu'elle est distribuée sur l'échantillon témoin. La reproduction erronée de l'information est directement liée à l'irrégularité de la grille de représentation et aux problèmes interpixels. Si le passage par la pseudo grille limite les pertes d'information aux frontières des pixels, en ce qui concerne les pertes d'information interpixel, il semble que les solutions proposées ne sont pas satisfaisantes. Les problèmes interpixels sont rencontrés lorsque plusieurs réponses sont cumulées dans la même cellule radar. Ces cas sont d'autant plus fréquents que le relief est accidenté. L'éclatement de la mesure suivant ces lois de distribution est inadapté face à un tel cas d'imagerie.

La première expérience (distribution suivant une loi d'équipartition) respecte la quantité physique mesurée. L'information est répartie en procédant à une moyenne. La quantité mesurée à l'origine est uniformément répartie. Par ailleurs, cette méthode ne tient pas compte du fait que la sommation (cumul d'écho) est cohérente. Lorsque le cumul des échos est tel que la mesure effectuée atteint l'état de saturation, alors la mesure faite à l'origine est sous-estimée. L'information perdue peut être importante puisque l'équipartition se fera sur une valeur de base plus faible. Ainsi les comptes numériques (CN) prendront une valeur moyenne plus faible que celle attendue sur l'échantillon

témoin. La dynamique des CN est réduite et peut gêner la photo-interprétation. L'erreur commise est répartie en fonction de l'éclatement, c'est-à-dire, en fonction des pixels concernés par le cumul d'échos.

Quant à la deuxième expérience, la loi de duplication ne procède pas à l'éclatement des mesures, si bien que les mesures sont conservées et simplement recopiées. Comme on ne sait pas modéliser cette somme cohérente des réponses incluses dans la même cellule radar, on préfère garder la mesure d'origine intègre. Dans ce cas la quantité physique mesurée est reportée sur les surfaces rétrodiffusantes dont les réponses sont cumulées au sein de la même cellule radar. Les fortes radiométries engendrées sont donc conservées, les versants éclairés sujet à ce phénomène trouvent leurs réponses rehaussées. Si un phénomène de saturation se produit, il se retrouve étendu sur plusieurs pixels. Cette distribution favorise donc, la production supplémentaire de zone de saturation.

Ces deux façons de procéder pour redistribuer l'information sont complémentaires. On sent bien qu'il est important d'éclater ces mesures qui ont été l'objet d'un cumul de réponses. Mais comme la sommation des échos enregistrés est cohérente, on note également qu'il est important de tenir compte des contributions relatives à l'intérieur de chaque pixel. L'étude de ces contributions relatives n'est pas simple à réaliser et demande l'élaboration d'un modèle radiométrique très fins. Nous proposons une solution qui consiste à utiliser une information *a priori* pour construire une loi de distribution plus fine. Cette information aurait pour but d'inférer la loi de distribution, afin que celle-ci soit mieux adaptée à la variabilité thématique du sol observé. Cette information externe pourrait être déduite par exemple, de la connaissance de la distribution de mesures optique. Dans tous les cas, elle doit renseigner sur les paramètres qui influencent la distribution des mesures originales SAR afin de modéliser au mieux leur distribution sur un canevas régulier. Ce qui revient à partir de l'étude de la distribution de mesures optique typiques, à estimer la distribution de mesures radar. L'inférence d'une distribution sur l'autre n'est pas évidente à modéliser car les caractéristiques physiques des mesures optique/radar sont relativement éloignées. De plus, pour être opérationnel l'échantillonnage des mesures optique devra être le plus fin possible, c'est-à-dire de résolution meilleure que les artefacts rencontrés sur l'image brute radar. Même si à l'heure actuelle de telles données ne sont pas disponibles, les améliorations apportées sur les futurs instruments devraient résoudre ce problème. Le satellite SPOT 5 devrait embarquer un instrument imageur capable de fournir des images dont la résolution spatiale serait de quelques mètres (~5 mètres).

Notre approche a été évaluée à l'aide de plusieurs cas synthétiques. L'observation par un capteur optique et par un capteur radar, d'une portion de sol dont l'orographie et la thématique (couverture) sont bien définies, a été analysée. On dispose ainsi d'un jeu de mesures optique et d'un jeu de mesures radar. Une table de correspondance est construite pour relier les réponses enregistrées par ces deux instruments. Des thèmes particuliers ont été choisis pour faciliter l'écriture de cette table :

"sol nu", "urbain", "forêt", "prairie". Par comparaison des images, nous avons établi une correspondance entre les CN optique et les CN radar pour une même classe. Cette approche est certainement rudimentaire et n'a été appliquée que pour valider le concept. L'influence de la distribution géométrique des mesures est maîtrisée à l'aide du modèle de prise de vue décrit antérieurement. Les zones de cumul sont clairement identifiées (image des ambiguïtés). La répartition de l'énergie des pixels sous-échantillonnés est réalisée par un éclatement de la mesure pondéré par le taux de participation des objets concernés (c'est-à-dire des objets dont l'écho retourné a été enregistré dans la même cellule radar). Ces taux de participation sont directement déduits de la table de correspondance. Cette distribution peut encore être affinée si l'on connaît pour chaque objet éclairé la mesure du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence ($\sigma^{\circ}=f(\theta_{\text{incident}})$). Les erreurs inhérentes au fait que la sommation de ces échos cumulés est cohérente pourraient ainsi être fortement réduites.

Les résultats obtenus sont très encourageants, même si le passage à un cas réel n'a pu être exécuté. La figure 6.11 permet de se rendre compte de l'avantage apporté par une telle loi de distribution. Elle minimise la perte d'information. La distribution obtenue est proche de la distribution témoin qui sert de référence.

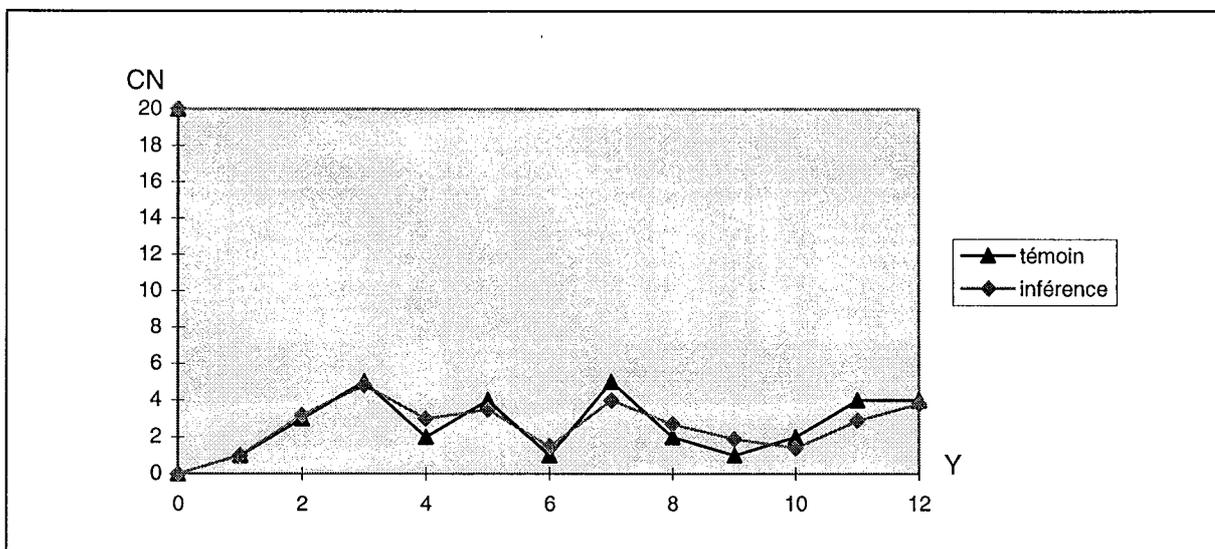


Figure 6.11 - Inférence par une information *a priori*

Cette approche demanderait également de se doter d'un système d'analyse capable de transcrire une distribution de mesures radar à partir d'une distribution de mesures optique. La déduction de la mesure du coefficient de rétrodiffusion enregistrée demande donc de se doter d'un modèle radiométrique qui outre la prise en compte du thème devra également à partir de la connaissance de l'angle d'incidence permettre de déterminer une mesure radar la plus juste ($\sigma^{\circ}=f(\theta_{\text{incident}})$). Ce module pourrait être construit par apprentissage sur un ensemble d'objets tests

prédéfinis. Bien que plus complexe à mettre en œuvre comparée aux premières solutions, les apports de cette méthode semblent très remarquables (Castagnas, 1993). Ce nouveau modèle de distribution de l'énergie ferait une répartition pondérée par l'analyse des différents thèmes concernés. Dans le cas où l'on traite des scènes dont la dynamique thématique n'est pas très étendue, il est possible d'envisager cette procédure. En effet, dans le cadre des opérations de classification supervisée, des lois d'inférences sont également utilisées, elles proviennent soit de parcelles d'apprentissage, soit de mesures *in situ*. Le regroupement de ces vérités terrain constitue parfois des étapes tout aussi complexes.

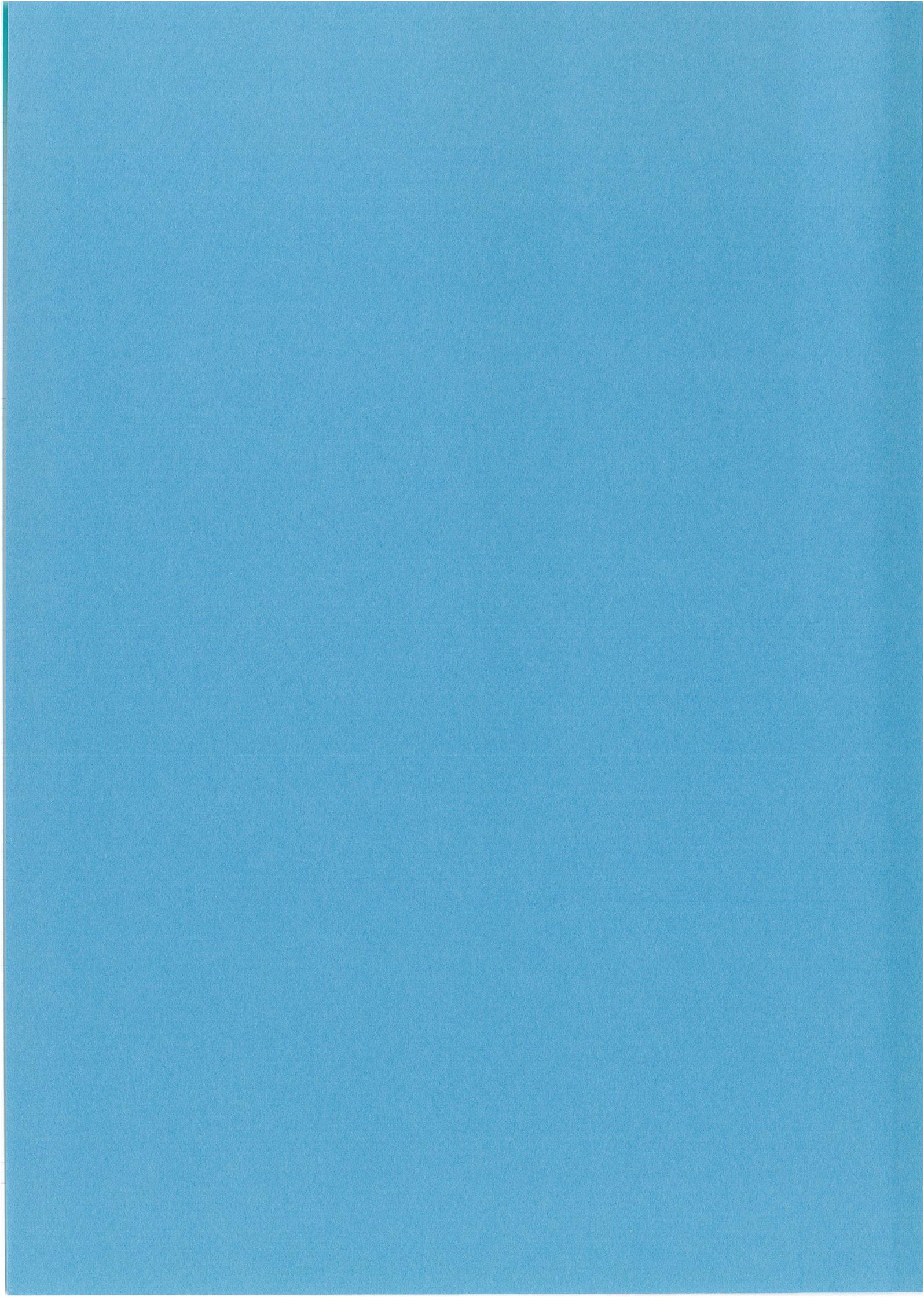
En ce qui concerne le passage au traitement des images réelles, nous avons dû nous limiter à l'application d'une loi de distribution qui tient compte simplement de l'orographie. La partition de l'information contenue dans une maille dont la mesure résulterait de plusieurs échos cumulés se fait en fonction de l'angle d'incidence local. Le but étant de préserver les mesures fines lorsqu'elles se présentent (versants sur-échantillonnés) et si possible d'améliorer celles qui sont par contre sous-échantillonnées.

6.6 CONCLUSION

Nous avons présenté un processus de création d'ortho-image ERS. Le processus est particulièrement adapté aux reliefs très accidentés, mais s'applique également à des régions dont l'orographie est mixte, c'est-à-dire comprenant à la fois des zones de relief accidenté et des zones de plaine. Pour cela nous avons construit une image de référence appropriée pour traiter le cas spécifique du traitement des images radar en région de relief accidenté. Il s'agit d'une image synthétique radar obtenue à partir d'une simulation de prise de vue au dessus d'un MNT. Sur cette dernière nous nous sommes réservés la possibilité d'ajouter des informations externes par incrustation. Cette façon de procéder correspond à une opération de fusion par incorporation. Cette procédure pourrait être approfondie dans le cadre de recherches menées pour la détection automatique de points d'appui.

De plus, des efforts ont été faits au niveau du ré-échantillonnage, en expérimentant une nouvelle voie. Il s'agit ici de procéder à une fusion multicapteur par inférence. L'amélioration du processus de ré-échantillonnage serait alors possible grâce à la prise en compte de l'imagerie optique.

La redistribution des mesures SAR sur un canevas régulier constitue un vrai problème d'actualité. Les acteurs qui se trouvent confrontés à ce genre de problèmes sont à l'heure actuelle dépourvus d'outils adaptés. Nous proposons une solution en construisant une loi de distribution plus appropriée.



Chapitre 7

ORTHO-IMAGES SPOT/ERS : UN EXEMPLE DE FUSION AU NIVEAU DU PIXEL

Ce chapitre présente les résultats d'un exemple de fusion au niveau du pixel. Dans un premier temps nous présenterons les différentes images manipulées, et la région concernée. Puis enfin, nous discuterons des utilisations conjointes des ortho-images SPOT/ERS qui ont été faites. Notre démarche pour construire une ortho-image radar a pu être testée sur la **région de Briançon** (Alpes, France). Le site test du bassin versant de la Durance a été choisi pour réaliser une étude (faisant partie des projets pilotes CNES/ESA), à laquelle l'Ecole des Mines de Paris a participé. Le thème général de cette recherche porte sur l'apport de l'imagerie satellitaire pour cartographier le manteau neigeux, vis-à-vis de la cartographie obtenue par des méthodes traditionnelles. Les intérêts de manipuler des images satellitaires sont multiples : large couverture au sol, accessibilité des données en terrain accidenté, conditions météorologique et climatique, fréquence d'acquisition des mesures. Des études précédentes ont montrées que la caractérisation complexe de la neige implique des informations d'origines variées et ont motivé cette recherche.

7.1 LES MOTIVATIONS

La durée, le taux, et les caractéristiques physiques (qualité de la neige) de l'enneigement sont les principaux critères pour étudier le manteau neigeux et dresser une cartographie en fonction de l'altitude. Les méthodes traditionnelles utilisent des mesures *in situ* provenant de stations météorologiques automatiques implantées sur les sites étudiés et de relevés effectués sur le terrain pour disposer d'une analyse qualitative de la neige et pour mesurer la hauteur de neige grâce à un ensemble de perches. L'époque de l'année à laquelle sont réalisées ces études est importante. Car la neige évolue au cours des saisons et même au cours d'une journée. En effet, cette évolution peut être très rapide lorsque la neige fond pendant la journée et regèle pendant la nuit, la température et la teneur en eau de la neige vont alors varier fortement. Il est important d'évaluer l'influence de ce changement sur les mesures issues des images satellitaires et l'implication de la dynamique pour une analyse multidade.

La promotion des images du SAR embarqué sur la plate-forme ERS repose sur deux atouts majeurs : la haute résolution et le fonctionnement tout temps de l'instrument. Cependant les instruments à bord de ERS, satellite océanographique, possèdent des caractéristiques qui n'ont pas été adaptées à l'origine pour réaliser la cartographie en zone de montagne. Mais il est important de dresser l'inventaire des applications possibles à partir d'une image SAR et justement de définir les caractéristiques optimales en fonction des domaines thématiques concernés (la longueur d'onde, l'angle de visée, ...) pour des missions futures.

La zone de montagne cartographiée avait déjà été l'objet d'une précédente étude utilisant des données de radiomètres optiques spatioportés. La grande couverture à la fois spatiale et temporelle de ces données s'était avérée très utile, cependant la limitation des observations par temps clair avait été remarquée. Et il est alors apparu intéressant d'examiner l'apport du radar imageur de ERS-1 dans ce domaine d'application. L'utilisation des images radar est préconisée pour faire apparaître les zones humides qui ne sont pas visibles à partir des autres capteurs. La détermination d'une surface enneigée sera basée sur l'estimation du contenu en eau. La mesure du coefficient de rétrodiffusion d'une telle surface dépend de plusieurs paramètres variables dans l'espace et dans le temps qui sont : l'**humidité**, la **stratigraphie**, la **rugosité**. La mesure résulte d'un mélange de plusieurs phénomènes physiques complexes dont : l'**effet du sol sous-jacent**, l'**effet de volume**, et l'**effet de surface**, qui sont à prendre en considération (Fily et Dedieu, 1993). Comme la profondeur de pénétration du signal dépend de la teneur en eau liquide, ce paramètre constitue un traceur pour déterminer s'il s'agit de neige sèche ou de neige humide.

7.1.1 Les paramètres physiques observés : l'humidité

Lorsque la neige est sèche, la rétrodiffusion a lieu principalement à l'**interface sol-neige**. Tandis que, pour une neige humide la rétrodiffusion a lieu à la **surface de la neige**. La forte teneur en eau rend la neige opaque au signal radar. Le coefficient de rétrodiffusion mesuré peut être bien plus faible que celui mesuré sur une surface de sol nu (Fig. 7.9). Dans le cas d'une neige sèche, la participation du sol bien qu'il soit recouvert, augmente la difficulté car cela implique une considération supplémentaire : la mise à disposition d'une carte d'occupation des sols ou d'une image acquise en absence de neige pour caractériser le sol.

7.1.2 Les paramètres physiques observés : la stratigraphie

Suivant les conditions climatiques, les cristaux de neige peuvent évoluer en cristaux de glace. La fonte et le regel successifs de la neige homogénéisent la surface qui se transforme en glace plus ou moins dure. La densité de la neige est modifiée et seule une analyse stratigraphique *in situ* permettait de la déterminer. Or la profondeur de pénétration du signal dépend de cette densité, la mesure résulte d'une **rétrodiffusion de volume dans les strates** traversées. L'influence de la densité de la neige permettrait de dissocier différents types de neige, d'identifier les glaciers et de suivre leur évolution pendant une saison complète. Les glaciers constituent des réserves en eau naturelle très importantes et leur étude intéresse notamment la compagnie d'Electricité de France - Gaz de France pour la gestion de l'approvisionnement en eau des retenues artificielles.

7.1.3 Les paramètres physiques observés : la rugosité

Un dernier paramètre physique a été mentionné : la rugosité de surface qui peut être modifiée de façon considérable après une avalanche importante. En effet celle-ci provoque des coulées de blocs de neige plus ou moins gros. L'observation de ces couloirs est fortement corrélée avec l'orographie du terrain.

Nous avons longuement discuté de l'influence de l'orographie sur une image radar. En zone de montagne les corrections géométrique et radiométrique sont indispensables dès lors qu'on s'intéresse à l'interprétation thématique de la scène étudiée. Ceci est d'autant plus vrai si l'on considère plusieurs images acquises à des instants différents avec des longueurs d'ondes différentes. La qualité géométrique de l'image estimée à partir de la fidélité de reproduction des structures est aussi

importante que la géométrie de l'image en elle-même. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain précis est alors indispensable pour calculer l'angle d'incidence local pour effectuer les corrections géométrique et radiométrique. La précision tant sur l'altitude (précision absolue) que sur l'orographie (précision relative) sont donc indispensables.

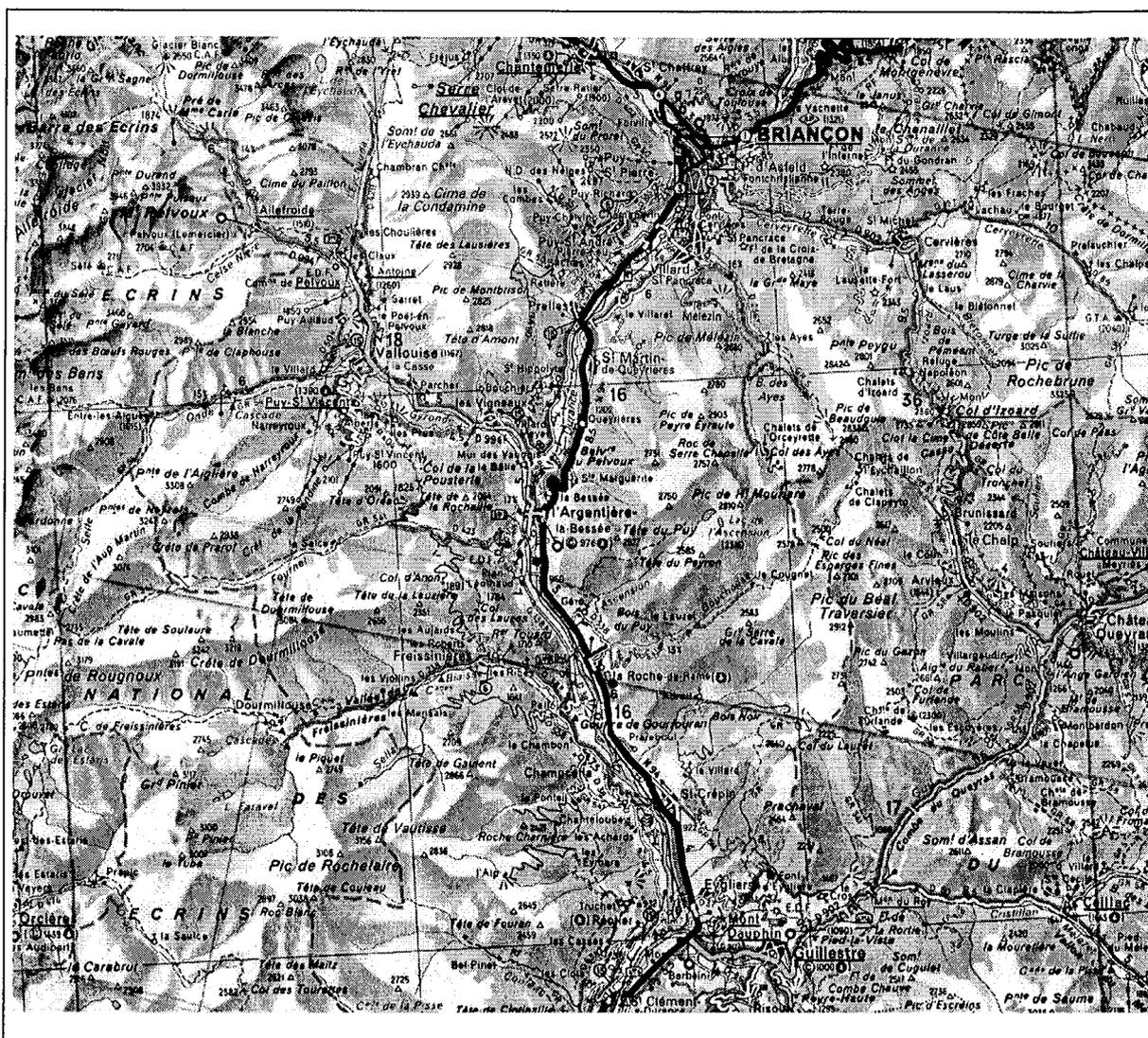
7.2 PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE

7.2.1 Situation géographique de la région de BRIANCON

La région de Briançon se situe dans le quart sud-est de la France, elle couvre une partie des Alpes du Sud. Des hauts lieu de l'alpinisme sont présents puisque la zone étudiée englobe le parc national des Ecrins et le parc régional du Queyras (comprenant le massif des Ecrins avec des sommets dépassant les 4000 mètres d'altitude et l'étroite vallée de la Durance). De nombreux massifs montagneux sont présents ; leur orientation variée, constitue une zone d'étude privilégiée face au multiple cas d'imagerie rencontrés.

7.2.2 Description topographique

Une carte topographique permet de cerner les caractéristiques de la région concernée et d'identifier les thèmes représentatifs (Fig. 7.1).



© Carte Michelin

Figure 7.1 - Cartographie de la zone étudiée

Au centre de cette zone, on observe la rivière de la Durance qui coule dans une vallée étroite. La limite nord de cette zone se situe au dessus de la ville de Briançon, et la limite sud juste en dessous de la ville de Guillestre.

Côté est, la partie étudiée englobe la limite ouest du parc régional du Queyras, dont quelques sommets représentatifs sont : le Pic du Mouriare 2810 mètres, le Pic du Béal Traversier 2912 mètres. L'orientation du relief est très importante vis-à-vis de la configuration de prise de vue. Les lignes de crêtes suivent deux directions privilégiées : nord/nord-est et sud/sud-est. Cette zone est présentée sur une des figures du chapitre précédent et illustre la différence entre une acquisition en phase ascendante et une acquisition en phase descendante.

Côté ouest trois vallées se découpent, toutes contenues dans le parc national des Ecrins. La première se dirige vers le massif des Ecrins en passant par les vallées de la Vallouise et d'Ailefroide. Les premiers sommets en bordure atteignent des altitudes de plus de 3000 mètres : le Pic de Neige Cordier 3613 mètres, la Barre des Ecrins 4102 mètres, le mont Pelvoux 3914 mètres, pour ne citer qu'eux.

Les deux vallées suivantes sont orientées est/ouest. La vallée de Fournel très étroite rejoint la vallée de la Durance au niveau de l'Argentière. Elle est encadrée de part et d'autre de sommets dont l'altitude est comprise entre 2700 et 3200 mètres. Quant à la dernière vallée (vallée de Fréssinières) au sud de la zone, elle sépare une ligne de crête : crête de Dourmillouse et un massif de plusieurs sommets : la tête de Gaulent 2866 mètres, la tête de Vautisse 3156 mètres, le Pic de Rochelaire 3108 mètres, et d'autres de moindre altitude.

La disposition des images SAR acquises en phase ascendante et descendante offre des vues variées de cette région. L'aspect des images est plus explicite lorsqu'on étudie au préalable les distorsions auxquelles nous avons affaire. Une première analyse sur l'orientation des massifs et des crêtes des chaînes de montagne permet d'estimer la proportion des cas d'imagerie favorables en regard des cas défavorables. Cette évaluation est affinée par la suite par la représentation de l'image des ambiguïtés.

7.2.3 Description thématique

Les thèmes représentés sur la scène étudiée peuvent être regroupés en deux catégories. D'une part ceux situés dans les fonds de vallée qui sont généralement couverts soit par un cours d'eau, soit par un axe routier, soit par des infrastructures humaines, avec quelques petites villes et industries. En ce qui concerne l'image SAR, il sera rare de disposer de cette information. Comme les vallées sont très étroites, que ce soit sur une image acquise en phase ascendante, ou descendante, elles seront souvent masquées par les distorsions de relief. La seconde catégorie de thème regroupe ceux situés sur les versants montagneux. La couverture du sol varie en fonction de l'altitude. Une trichromie SPOT a été réalisée à partir d'une image multispectrale SPOT XS 123. Cette composition colorée permet d'apprécier ces dernières remarques. Elle est illustrée sur la figure 7.2. Il est utile de se livrer à une photo-interprétation de cette scène afin de noter les détails qui seront visibles sur les différents supports d'information. Ces détails pourront servir également de points d'appui pour vérifier la qualité de la mise en correspondance des différentes modalités.

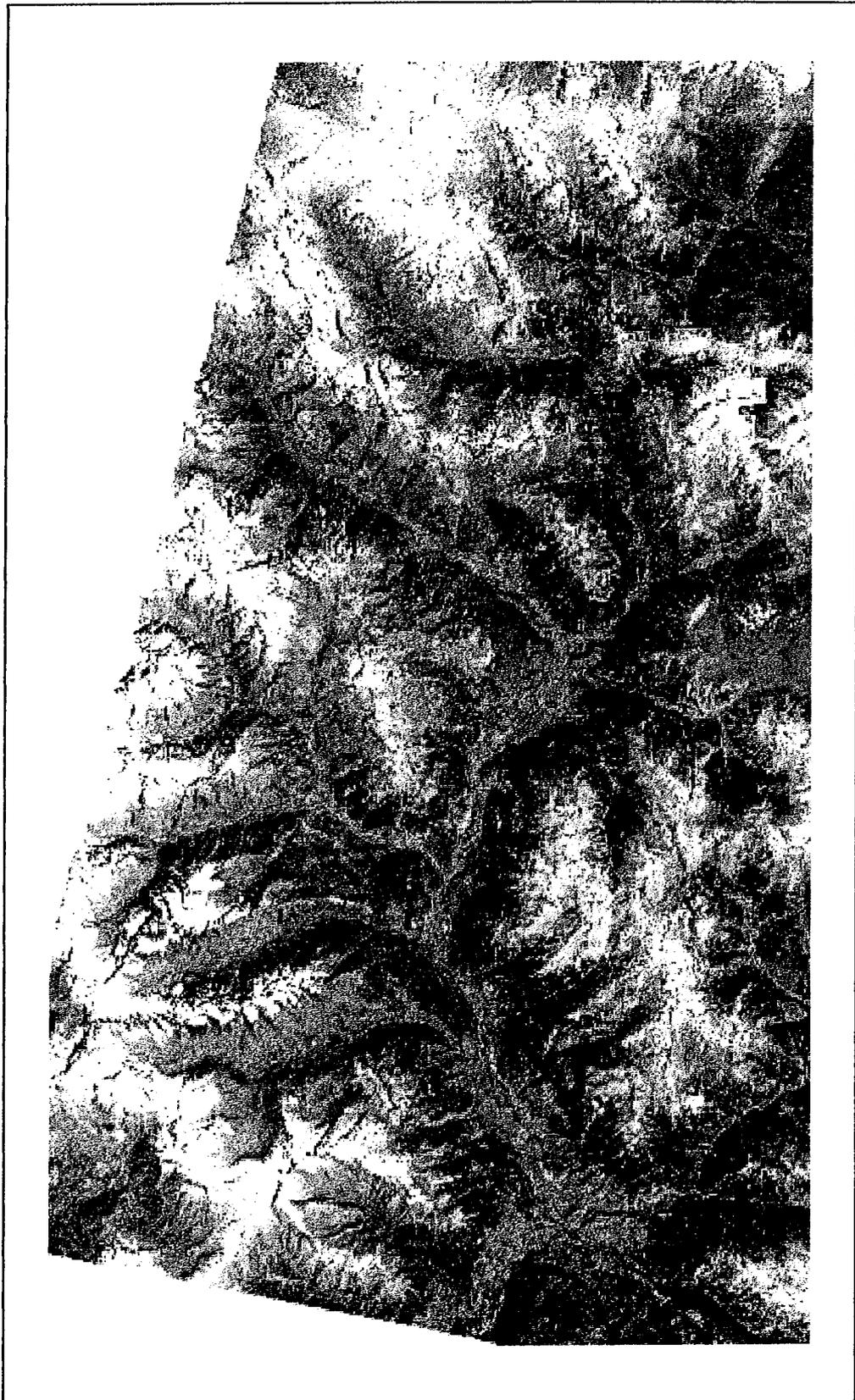


Figure 7.2 - Composition multispectrale SPOT XS 123

7.3 PRESENTATION DES DONNEES INITIALES

Concernant l'image optique, nous avons donc disposé d'une image multispectrale XS 123 datant du 18 juin 1993. La résolution de cette image est de 20 mètres, l'acquisition a été faite par une visée au nadir. Concernant les images radar, il s'agit d'images au format SLC (*Single Look Complex*) fournies par l'unité britannique de traitements (UK-PAF). Deux prises de vue l'une en phase descendante et l'autre en phase ascendante ont été choisies, datant respectivement du 11 et 30 juin 1993. La scène descendante a été préférée, essentiellement parce qu'elle offre les meilleurs cas d'imagerie pour les versants nord. Cependant les deux scènes ont été traitées. Ces images sont présentées sur les figures 7.3.a et 7.3.b. On apprécie les déformations géométriques du relief, qui bascule vers le capteur. On reconnaît les principaux massifs ainsi que la vallée de la Durance. Pour faciliter la lecture, elle sont présentées en radiométrie négative.

La mise à disposition d'un MNT de qualité reste un problème d'actualité. La modélisation du relief est très importante et demande un produit de haute définition. La qualité de notre MNT a été remise en cause, ce qui a entraîné beaucoup de problèmes et par conséquent du retard dans le déroulement des travaux. Celui-ci a été construit sur une grille de coordonnées Lambert III, à partir du point nord-ouest $X=916$ et $Y=3324$, de dimensions : 1920 lignes * 1152 colonnes, le pas d'échantillonnage est de 30 mètres (Fig. 7.4). Cet MNT a été obtenu à partir de la numérisation de courbes de niveau de plage de 200 mètres interpolées à 20 mètres par convolution bi-cubique et codées sur 8 bits :

$$\text{altitude (m)} = \text{CN} * 20 \quad \text{avec, CN : compte numérique} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

Le mode d'obtention de cet MNT est la cause des défauts rencontrés. La précision altimétrique absolue n'est pas très élevée mais elle permet d'obtenir un premier modèle de déformation géométrique de qualité. L'application de ce dernier permettra de simuler une image radar. A ce premier modèle de déformation est associé un deuxième modèle issu de l'appariement de points homologues entre une image synthétique radar et l'image brute SAR. La précision clinométrique quant à elle, est très faible et a d'ailleurs rendu la sélection de ces points homologues très laborieuse. Une constatations visuelle, en regardant l'image synthétique appuie cette remarque.

Cette région de relief très accidenté, fait que l'image radar brute n'est pas très facile à interpréter. Les déformations dues au relief sont telles, qu'il semble difficile d'utiliser ces images sans traitement approprié. Les recouvrements sont nombreux et les vallées sont souvent masquées. Aussi seules des applications visant l'étude des versants montagneux paraissent intéressantes. Dans notre cadre, il s'agit d'analyser la couverture neigeuse et si possible de caractériser le taux d'enneigement en

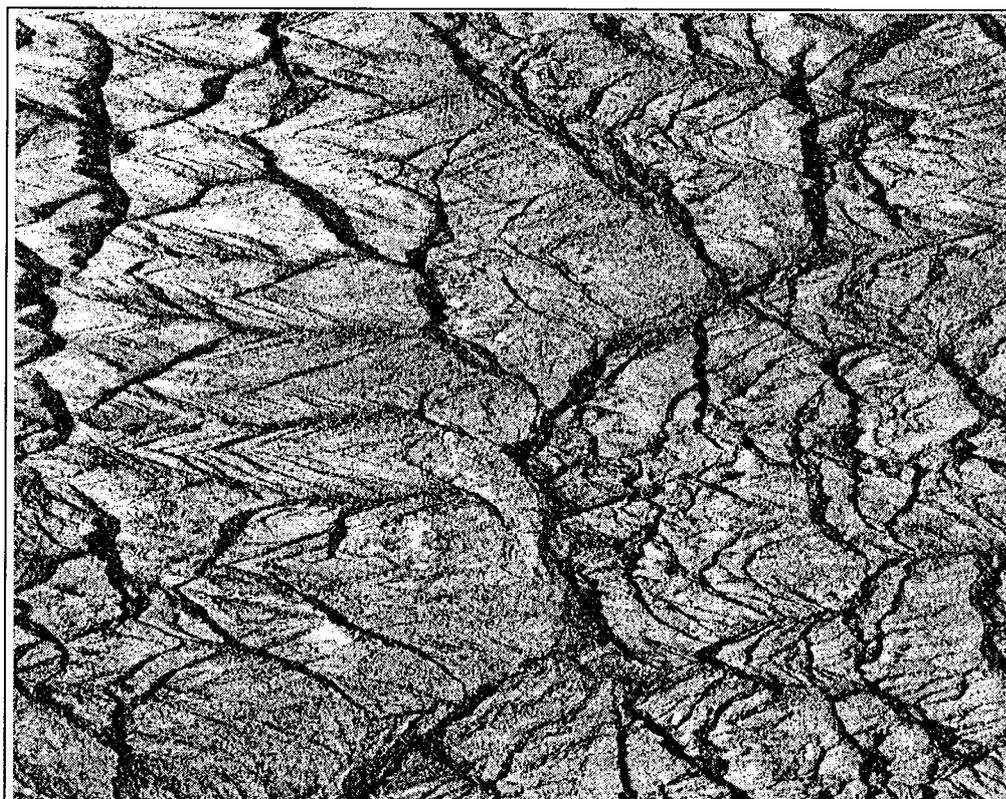


Figure 7.3.a - Image SAR ERS en phase ascendante

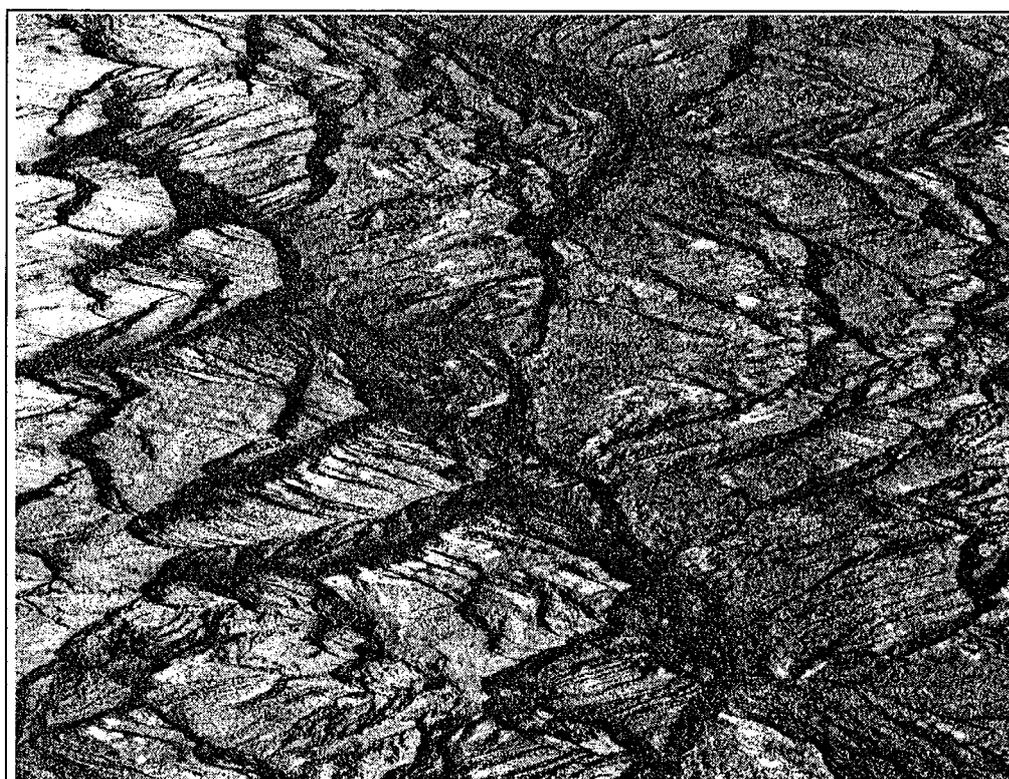


Figure 7.3.b - Image SAR ERS en phase descendante



Figure 7.4 - Modèle Numérique de Terrain

en séparant les différentes variétés de neige. Ce qui implique, à partir des mesures, la déduction par exemple, de paramètres tels que : l'âge, la dureté, ou encore le contenu en eau, de la neige. Cette étude sera faite à partir d'une analyse multispectrale des scènes SPOT/ERS. Une classification sera réalisée afin d'extraire des informations pertinentes sur le manteau neigeux. L'extraction de tels attributs ne peut se faire que si les données sont étalonnées, c'est-à-dire, si la mesure est corrigée de ces effets de relief. Les caractéristiques orographiques sont un atout supplémentaire pour identifier le type de neige. La prise en compte d'un MNT peut dans certains cas écarter la confusion thématique lors d'une classification (Bernard-Brunet *et al.*, 1993). Des informations variées augmentent le pouvoir discriminant pour améliorer l'identification des classes. Aussi une base de données comprenant des images satellitaires, un MNT, des cartes géographiques, des informations météorologiques, et des mesures *in situ*, est constituée. Le MNT est alors utilisé à des fins différentes de celles déjà évoquées, mais les critères de qualité restent valables quant à la réussite de la classification. Les résultats de cette étude ne font pas l'objet du présent mémoire. Aussi nous ne présenterons pas de résultats à propos de cette opération de classification, par contre nous discuterons du conditionnement des images pour intégrer cette base de données.

7.4 ORTHO-IMAGE SAR : TRAITEMENTS MIS EN ŒUVRE

7.4.1 Filtrage du speckle

L'analyse multirésolution a été appliquée sur l'image brute, le premier plan d'ondelette a été filtré avec le filtre de Wiener, le contraste de l'image est amélioré tout en préservant les structures de l'image (lignes de crête) (Cauneau et Ranchin, 1993). Ces données offrent une résolution radiale de 8m et une résolution azimutale de 4m. On a vu dans le second chapitre comment on pouvait passer du repère instrument au repère sol. La résolution radiale de 8m dans le repère instrument se trouve modifiée lors du passage dans un référentiel sol, sa projection est alors proche de 30m. La résolution azimutale, quant à elle, est mise à profit pour atténuer encore le speckle sur l'image. L'image brute a été ramenée à une résolution spatiale de 32m en azimut (ce qui correspond à un traitement avec un nombre de vues $N=8$). On dispose alors d'une image de résolution 30m*32m. Ce qui nous permet de manipuler une image dont la grille de représentation est plus en rapport avec celle du MNT qui est de 30m*30m.

7.4.2 Traitement du MNT

La précision clinométrique a souffert du processus d'interpolation utilisé pour fabriquer le MNT. De nombreux défauts ont été générés et un pré-traitement a dû être appliqué sur le MNT, afin de pallier à ces derniers. Pour cela un masque a été constitué pour les marquer. Ces défauts étaient principalement situés en plaine, où certains échelons (ou terrasses) subsistaient, notamment dans la vallée de la Durance et au sud de Briançon. Certains points singuliers ont été également identifiés dans la vallée de la Durance et dans les massifs à l'ouest. En outre, l'interpolation des classes d'altitude avait généré des oscillations au voisinage des seuils les plus marqués.

La localisation de ces défauts est très vite détectée sur l'image synthétique. Nous avons vu l'influence d'une erreur de la modélisation orographique du terrain sur l'image des points observés. Une fois que le masque est construit, les zones du MNT erronées sont lissées afin d'éliminer les faux accidents (oscillations). Cette opération est supervisée par l'étude d'une carte topographique IGN au 1/25000 ème.

Le premier résultat consiste à fabriquer une image synthétique radar qui va jouer le rôle d'une image de référence. La simulation d'une acquisition en phase ascendante est illustrée sur la figure 7.5.

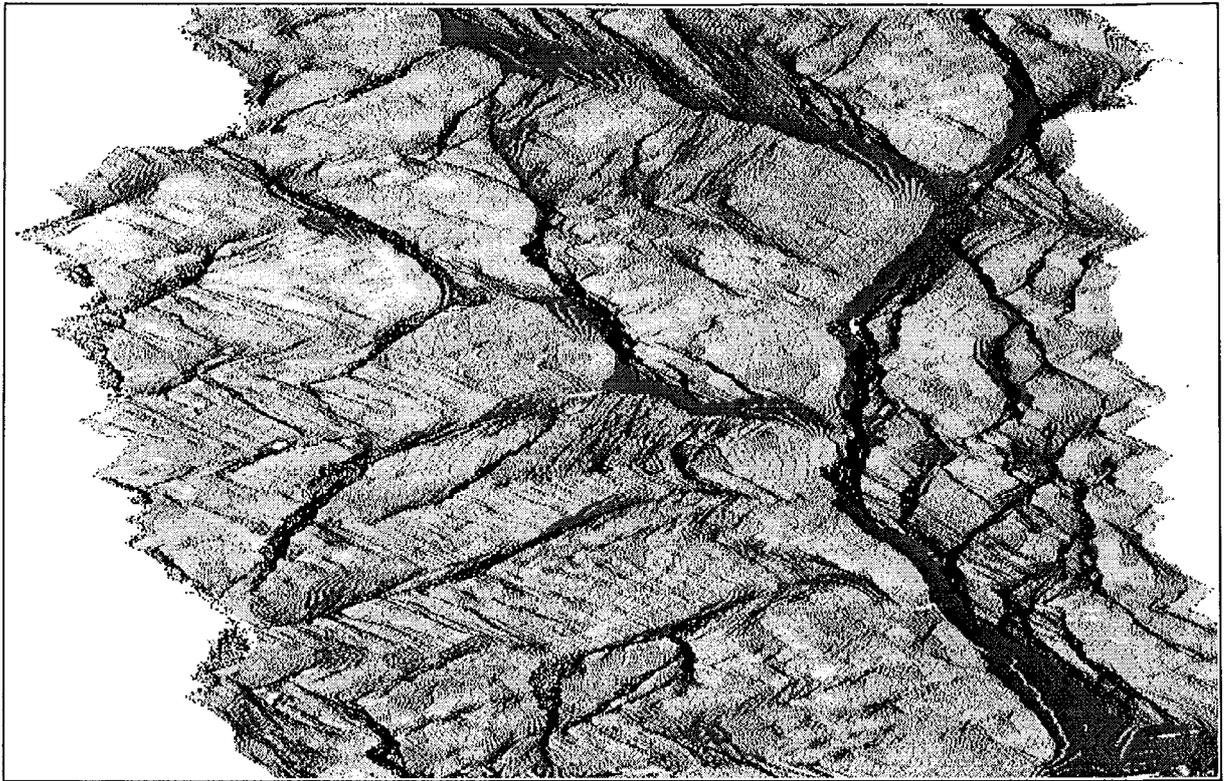


Figure 7.5 - Image synthétique

Comparons la figure 7.5 (image synthétique) et la figure 7.3.a (image SAR ascendante brute), toutes deux représentées avec une radiométrie négative. Il est facile de se repérer grâce à la vallée de la Durance. On situe au nord et au sud respectivement les villes de Briançon et de Guillestre. Avec au centre le départ sur la gauche vers les vallées de la Vallouise et d'Ailefroide. On constate qu'une partie des vallées est masquée par les effets de repliement du relief. On aperçoit également les effets des terrasses du MNT sur les fonds de vallée larges. Les lignes de crêtes et les sommets constituent des détails très fins qui sont des cibles privilégiées pour la sélection de points d'appui.

7.4.3 Mise en correspondance

On procède à la prise d'amers. Ici comme le relief est très accidenté sur la globalité de la partie étudiée, il est facile de disposer d'un ensemble de points de contrôle bien répartis sur toute la partie traitée. En effet les lignes de crêtes offrent de bonnes indications et permettent de relever un grand nombre de points d'appui. Lors de notre premier traitement une trentaine d'amers avaient été retenus. Par la suite nous avons constaté qu'un nombre plus restreint d'amers suffit, vu que cette

dernière opération vise à affiner la superposition entre l'image de référence et l'image brute qui sont déjà très proches. Une vérification peut être rapidement faite en constatant qu'un modèle d'ordre un (dédit à partir de ces points de contrôle) suffit pour réaliser la superposition.

L'application du modèle inverse fait appel à une tâche délicate : le ré-échantillonnage. Celui-ci conduit à l'obtention de l'ortho-image radar. La méthode utilisée a consisté à répartir l'information en modélisant sa distribution en fonction de l'orographie du terrain.

Outre les problèmes de géolocalisation que nous venons de résoudre, une autre difficulté apparaît lors de l'interprétation et réside dans la correction radiométrique à appliquer en fonction de l'exposition du terrain par rapport au faisceau. Cette étape correspond à un étalonnage des mesures SAR afin d'obtenir une image des σ^0 exprimée en dB.

7.5 IMAGE DES AMPLITUDES

Le premier traitement appliqué aux données SLC consiste en une égalisation radiométrique par canal (correction de gain et de biais sur les canaux en phase et en quadrature) et au passage de l'image complexe vers l'image des amplitudes.

L'expression de la section efficace de rétrodiffusion σ_0 (en dB) est (Laur, 1992) :

$$\sigma_0 \approx \frac{I}{K} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{\text{ref}}} \cdot \frac{R^3}{R_{\text{ref}}^3} \frac{1}{g^2(\theta)} \quad (\text{Eq. 7.2})$$

L'équation est normalisée par rapport à un pixel de référence, généralement choisi au centre de scène.

avec : I, intensité d'image

K, constante d'étalonnage = 59,49dB \pm 0,75dB

α , angle d'incidence local

R, distance radiale antenne/cible

g, gain d'antenne

θ , l'élévation

Le calcul de l'angle d'incidence local ne peut être fait localement en considérant l'orientation orographique des plus proches voisins considérés. En effet, des problèmes surviennent dus aux terrasses du MNT (Curlander *et al.*, 1992). Cela est dû au codage de l'altitude (numérisation de courbes de niveau de 200 mètres), face à l'échelle des accidents de relief (Jakob *et al.*, 1993). Le difficile compromis entre la précision altimétrique et clinométrique a d'ailleurs été discuté par Polidori

(Polidori, 1995). Pour pallier aux échelons (variation de pente brutale qui se traduit par des marches d'escalier) rencontrés à la frontière des terrasses du MNT, une méthode par incrément a été mise en œuvre (Cauneau, communication personnelle), pour le calcul de l'angle d'incidence local, α_{local} . Elle consiste à tenir compte de la morphologie du terrain sur un voisinage étendu autour du point considéré pour appliquer un lissage local. Ce voisinage correspond à une fenêtre dont la taille varie en fonction de la définition du MNT original. La figure 7.6 représente l'image des α_{local} obtenus par cette méthode.

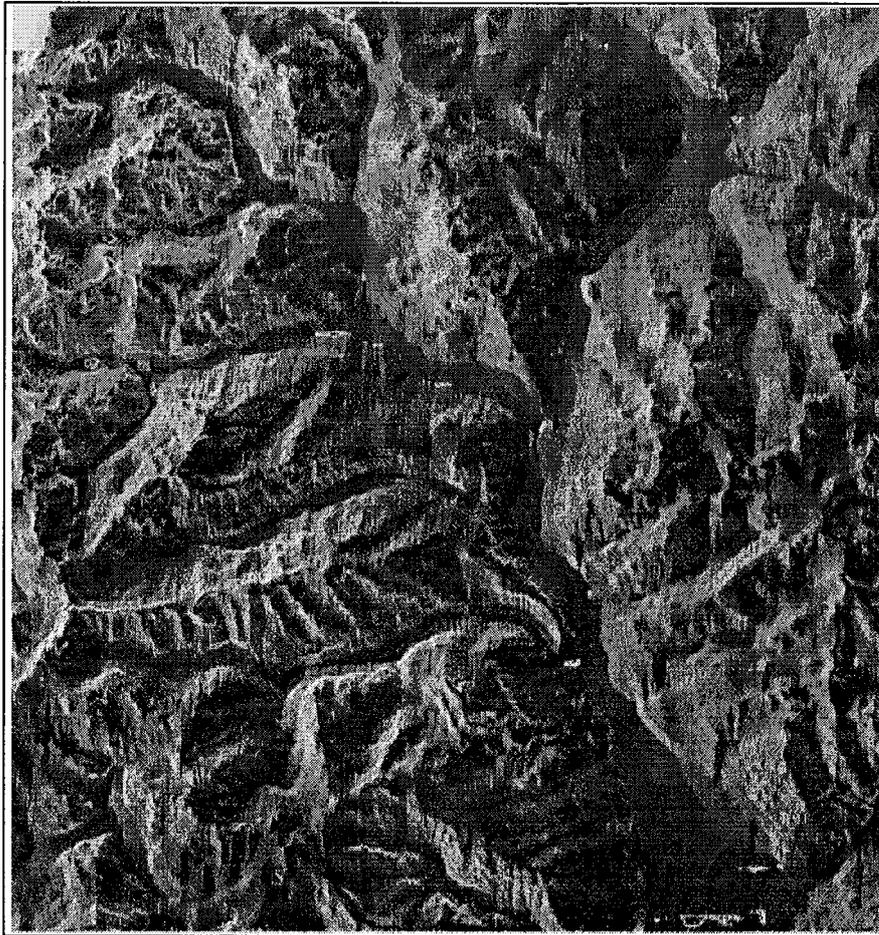


Figure 7.6 - Image des α_{local}

7.6 QUALITES DES ORTHO-IMAGES

Les ortho-images obtenues sont présentées sur les figures 7.7.a et 7.7.b. Il est utile de les comparer afin de déterminer leurs caractéristiques. Le contraste entre les versants exposés et ceux situés dans l'ombre permet d'étudier l'orographie du terrain. La précision de celle-ci est dépendante de celle du MNT dont nous avons déjà discutée. Cette projection cartographique représente un avantage certain pour la photo-interprétation.

La configuration de visée fait que les versants situés au nord sont dans l'ombre sur l'image ascendante. De ce fait le massif montagneux, situé à droite de la vallée de la Durance (limite ouest du parc régional du Queyras), est bien reproduit. Tandis que l'orographie du massif situé à gauche de la vallée de la Durance (limite sud du parc national des Ecrins) est moins facile à interpréter. Les crêtes se distinguent plus difficilement. Par contre les fonds de vallée sont relativement peu masqués sur cette image. L'image descendante quant à elle, offre des caractéristiques complémentaires. Peu d'information pourra être extraite des fonds de vallée souvent masqués par le phénomène de repliement du relief. Mais l'orientation de la prise de vue favorise dans ce cas de visée, la perception des massifs montagneux situés à gauche de la vallée de la Durance.

Etant donné que l'orientation du relief par rapport à l'orientation de visée influence sa perception, la comparaison de ces prises de vue reste laborieuse avant le géocodage. Pour s'en convaincre il suffit de regarder sur la figure 6.3 les extraits de prises de vue croisées sur le même site. Mais ramenées dans le même référentiel, les images radar ascendante et descendante offrent une excellente restitution du relief. L'intérêt à utiliser des prises de vue croisées ne porte pas seulement sur l'aspect géométrique. Une étude thématique de ces images peut tirer parti de leur aspect complémentaire en réalisant une image composite qui résulterait de leur association. Cependant cette démarche demande de procéder à des corrections radiométriques fines pour lever les ambiguïtés dues au fait que les versants ne sont pas observés avec le même angle de visé, et au fait que les images ne sont pas acquises au même instant.

D'avance nous savions que la qualité géométrique locale serait limitée par la résolution altimétrique du MNT. La précision du recalage géométrique a été vérifiée à l'aide de points de contrôle. L'erreur résiduelle est inférieure à 1,5 pixel (<45m), ce qui reste acceptable compte tenu des caractéristiques du MNT. La qualité géométrique globale a été validée en réalisant la superposition entre l'ortho-image et une carte IGN à l'échelle de 1/200.000 ème. Cette carte a été numérisée au pas

de 30m. Une analyse visuelle est faite par superposition de l'ortho-image SAR et de la carte géographique. Celle-ci est montrée sur la figure 7.8.

Le temps de calcul nécessaire pour l'obtention d'une ortho-image SAR par la mise en œuvre de cette chaîne de traitement est difficile à évaluer. S'il est facile de prévoir le temps de calcul pour la réalisation des traitements informatiques, il semble difficile de définir le temps moyen nécessaire pour la sélection de points homologues entre l'image synthétique radar et l'image brute SAR. Cette étape reste de loin la plus longue et dépend fortement des compétences de l'opérateur et de son éducation visuelle pour s'acquitter d'une telle tâche.

7.7 STRATEGIE : FUSION DES ORTHO-IMAGES SAR ASCENDANTE ET DESCENDANTE

Il est à noter une remarque importante au sujet de la qualité radiométrique et de la qualité géométrique. Si les versants qui fuient le capteur sont l'objet d'un sur-échantillonnage et par la même offrent une meilleure résolution spatiale, en revanche ils offrent une mauvaise résolution radiométrique. Car la partie du signal rétrodiffusé en direction de l'antenne réceptrice est faible. Par contre c'est l'inverse qui se produit dans le cas des versants qui font face au capteur. Ceux-ci ne possèdent pas une bonne résolution spatiale, en revanche lorsqu'ils sont sujets à une réflexion spéculaire dans la direction de l'antenne réceptrice, une réponse maximum est enregistrée offrant ainsi une excellente résolution radiométrique (pour des pixels qui ne sont pas sujets au cumul d'échos et à condition que leur radiométrie ne soit pas saturée). La qualité des résolutions varie de façon opposée. Aussi l'utilisation de plusieurs images radar acquises en phase ascendante et descendante a été préconisée pour pallier à cet inconvénient. L'idée étant de profiter de la meilleure résolution spatiale et de la meilleure résolution radiométrique en combinant les deux types de visée.

Cependant les images acquises en phase ascendante et descendante ne sont pas acquises au même instant de la journée. Les images de la phase ascendante sont acquises en fin de journée tandis que les images de la phase descendante sont acquises le matin. Des travaux récents (Jonhsen *et al.*, 1995) montrent que la différence des conditions d'observation (conditions atmosphériques), perturbe de manière très significative les mesures. Cette étude a été menée sur un relief moins accidenté. Après correction radiométrique un écart supérieur à 7 dB. est relevé, entre les deux types d'acquisition, sur une même parcelle enneigée. Ainsi la solution qui consiste à croiser les deux types d'acquisition, en regroupant les images ascendante et descendante, n'a pas directement été retenue dans le cadre de cette application.



Figure 7.7.a - Ortho-image ERS ascendante



Figure 7.7.b - Ortho-image ERS descendante

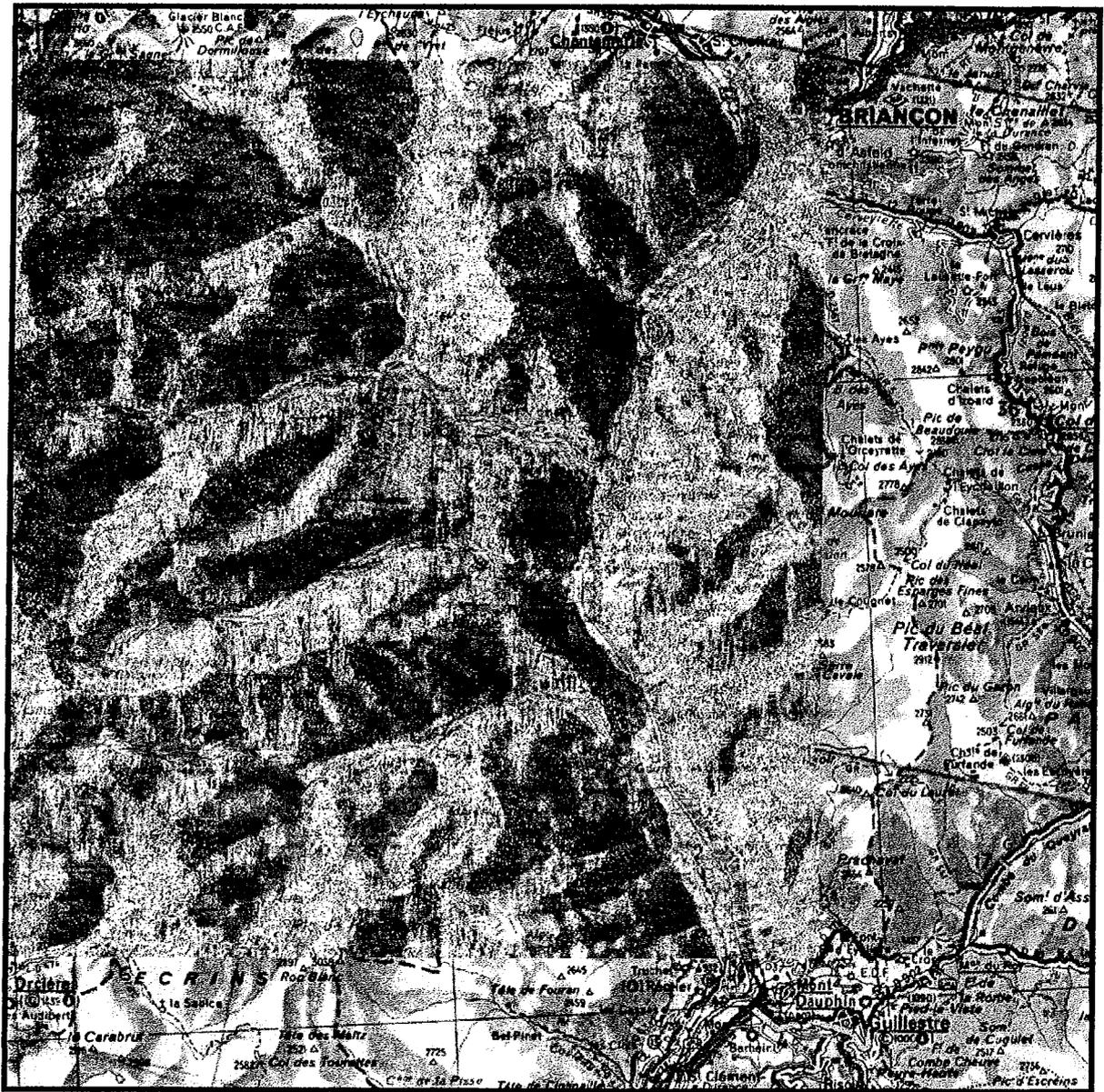


Figure 7.8 - Incrustation de l'ortho-image SAR sur une carte géographique

7.8 APPLICATION : ETUDE DU MANTEAU NEIGEUX

La démarche proposée (Cauneau, communication personnelle), consiste à croiser l'information issue de l'ortho-image radar avec l'information *a priori* contenue dans un système d'information géographique (SIG). On cherche à réaliser une classification supervisée afin de mettre en évidence les zones enneigées. L'information *a priori* sera issue entre autres de l'ortho-image optique. Des parcelles d'apprentissage sont extraites d'une première classification faite sur l'ortho-image optique. Ce qui revient à appliquer une loi d'inférence à partir d'informations *a priori* qui guident l'interprétation de l'ortho-image radar. Ce type de fusion porte sur l'exploitation du caractère redondant des données vis-à-vis de leur aptitude à cartographier le manteau neigeux.

Grâce à l'analyse de la section efficace de rétrodiffusion, très sensible aux caractéristiques intrinsèques des objets observés (permittivité, constitution, rugosité...), il est possible de discerner pour un même thème des variétés différentes. Dans le cas de la neige, nous avons vu dans l'introduction l'influence des caractéristiques du manteau neigeux sur la mesure du coefficient de rétrodiffusion. Les phénomènes impliqués doivent être bien entendus, reliés à la configuration de prise de vue, car l'élévation sous laquelle est observé l'objet conditionne également la réponse du signal rétrodiffusé. On peut s'attendre à dissocier la neige sèche de la neige humide, même si dans notre cas le relief est très accidenté (pentes supérieures à 40 degrés). La figure 7.9, regroupe l'ensemble des signatures radar caractéristiques qu'il est fréquent de rencontrer sur des sols de montagne. Cette modélisation a été réalisée par Cauneau (communication personnelle), en concentrant les travaux de plusieurs auteurs (Murphy et Haykin, 1987 ; Bredow et Gogineni 1990 ; Karam et *al.*, 1992).

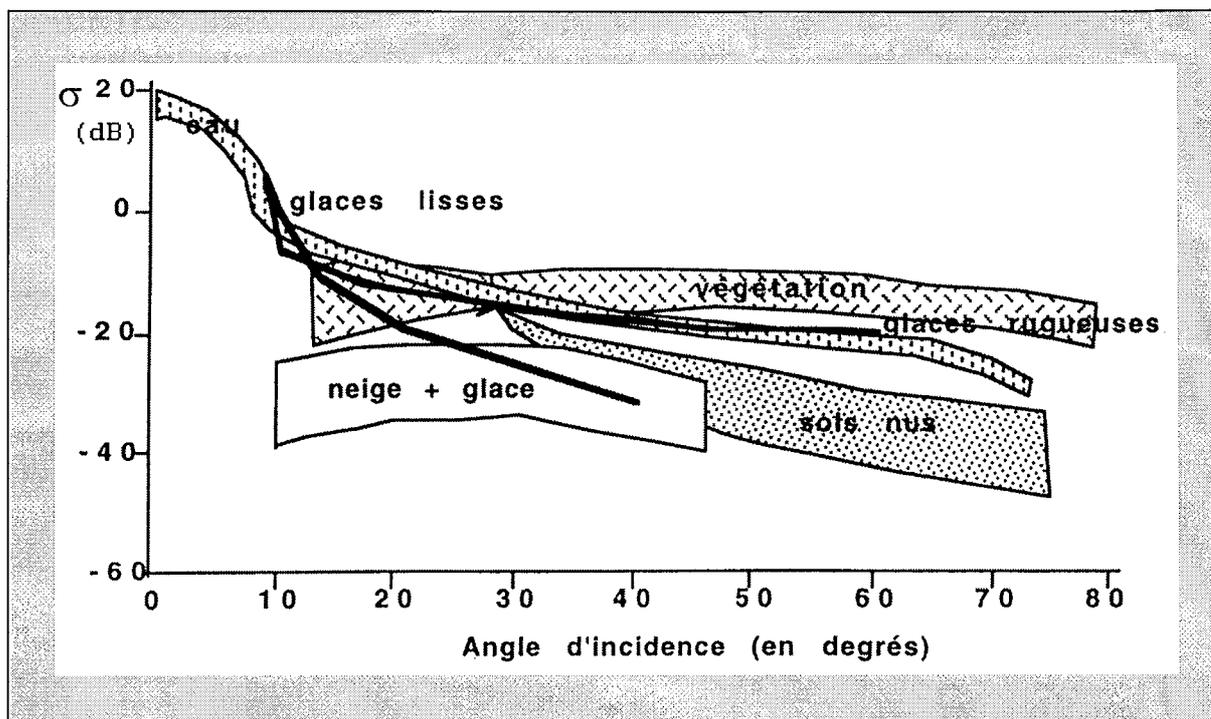


Figure 7.9 - Dépendance de la section efficace de rétrodiffusion (en dB.) en fonction de l'angle d'incidence local pour les principaux types de terrain rencontrés dans la zone étudiée.

Même incomplète, (pour les fort angles d'incidence, où la signature de la neige reste à préciser), cette figure permet de réaliser la complexité du problème. Le changement de la signature radar du terrain en présence de neige/glace change de manière cruciale en fonction de sa composition. Une averse de neige, l'ensoleillement peuvent modifier totalement cette caractéristique, et le nombre de paramètres physiques nécessaires pour réaliser une modélisation de ces signatures (stratigraphie de la glace, âge, granulométrie, contenu en eau liquide, ...) dépasse de loin le degré de connaissance intégré dans les dispositifs opérationnels.

Cependant, pour un angle d'incidence donné, la signature radar d'un terrain couvert de neige ou de glace est en général différente de celle des autres types de couvert : plutôt moins rétrodiffusante pour la glace. En particulier les glaces rugueuses apparaissent plus rétrodiffusantes qu'un sol nu, pour une pente donnée.

C'est cette spécificité qui sera mise à profit pour réaliser une classification supervisée des images SAR. Pour chacune des parcelles d'apprentissage, le modèle de classe est construit dans un espace à deux dimensions constitué de la section efficace de rétrodiffusion et de l'angle d'incidence local. La réalisation de cette classification a été récemment effectuée par Cauneau et Pons (Cauneau, communication personnelle). Cependant le caractère nouveau de ce type d'étude demande de grandes

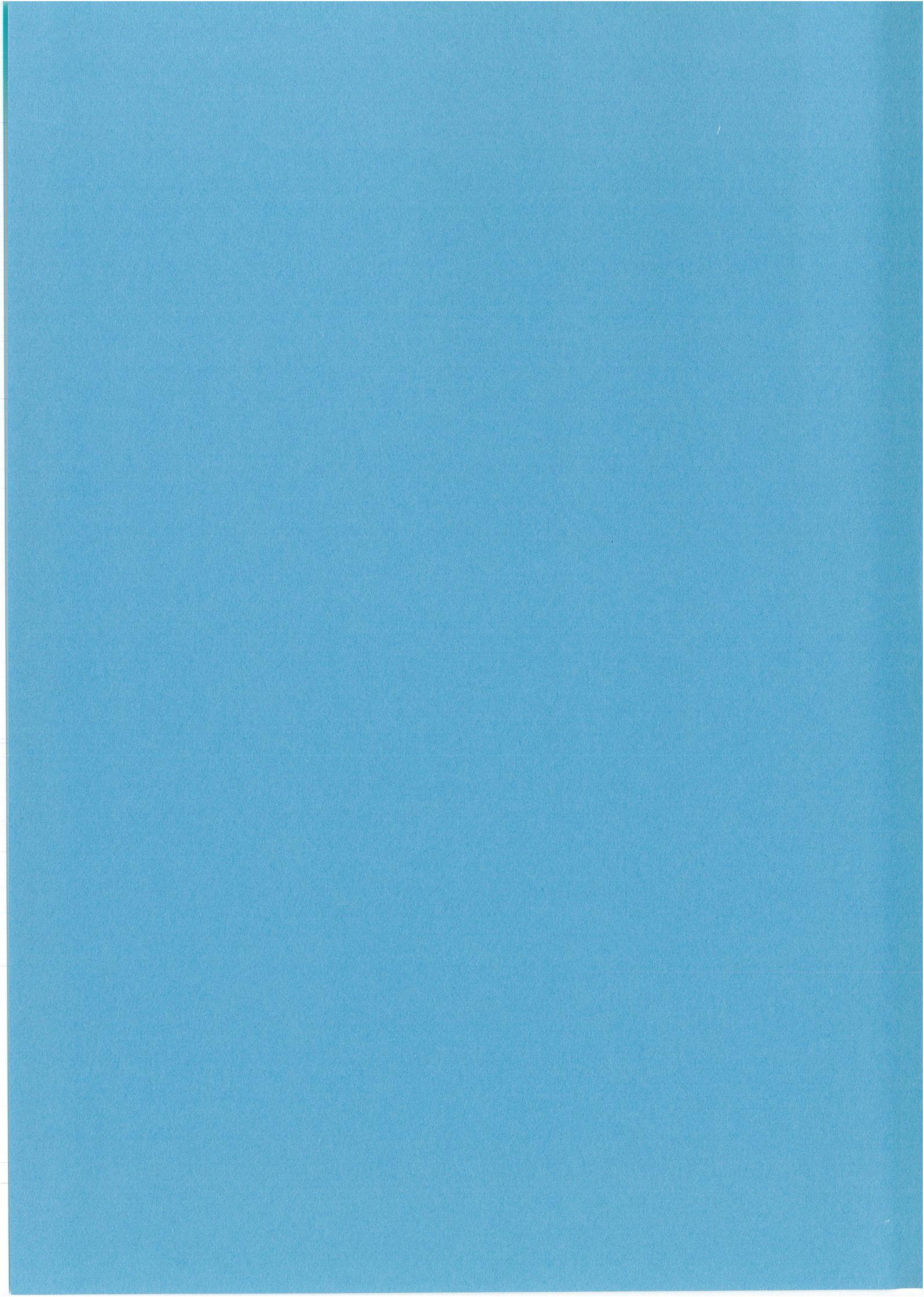
précautions quant à l'interprétation des résultats. De nombreux facteurs sont à prendre en considération et demandent la participation de spécialistes dans le domaine de l'enneigement.

7.9 CONCLUSION

Ce type de fusion nécessite de superposer au niveau du pixel les images optique et radar. Le résultat se présente souvent sous la forme d'une image composite, destinée essentiellement à la cartographie. Ce produit peut clairement être utile pour les zones encore mal ou non cartographiées. La prise en compte des données radar demande de la part des applicateurs une certaine éducation visuelle, car la lecture de ces données est moins intuitive. L'aspect géométrique spécifique des images SAR, limite l'utilisation de celles-ci sur des régions où le relief est très accidenté.

L'utilisation en final de cette cartographie originale (interprétation thématique) dépend d'une part de la qualité de la co-géolocalisation des différentes images, et d'autre part de l'information résiduelle après les opérations de ré-échantillonnage.

Les régions concernées posent des problèmes liés au fait que l'on ne dispose pas ou rarement de vérité terrain ou même de MNT précis. L'implication d'un MNT dans la procédure est indispensable bien qu'il limite la qualité du résultat. En effet, les erreurs tendent à augmenter avec l'augmentation du relief et la diminution de la qualité du MNT. La collaboration multicapteur (base de connaissance, information *a priori*), associée aux nouvelles techniques d'interférométrie, pourrait permettre de trouver des solutions à ces manques.



Chapitre 8

CONCLUSION

Les travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse ont permis, au travers de deux exemples de fusion, d'étudier la **synergie** qui découle de l'association d'images multispectrale optique/radar. Ces applications ont été menées dans les domaines de l'agronomie et de l'enneigement. La première vise à suivre l'évolution de la croissance d'un végétal au cours du temps. Quant à la seconde, elle porte sur la reconnaissance des zones de montagne enneigées. La définition précise de l'application, et des discussions avec les utilisateurs du résultat de la fusion s'imposent pour choisir un processus approprié. En effet, les opérations de fusion qu'il est possible de mener à partir de ces données multisource, utilisent des **stratégies** très variées. Parmi ces opérations, deux ont été expérimentées : la **fusion d'attribut**, la **fusion de pixel**. Le rapprochement physique, plus ou moins effectif, des données permet de dissocier deux lois d'association : **loi d'incorporation**, ou **loi d'inférence**.

La particularité et la jeunesse des données radar explique notre manque d'expérience vis-à-vis de leur traitement. Aussi l'utilisation de celles-ci se fait toujours en regard avec des données optique considérées comme référence. Les études traitées ici, se consacrent à l'examen de **l'apport des mesures radar** au sein d'applications traditionnellement effectuées avec des mesures optique déjà éprouvées. Mais il est nécessaire de passer par cette **étape de validation** afin d'affirmer la position des mesures radar, et de conforter les prédictions quant à leur aptitude à rendre compte du phénomène étudié.

La **comparaison** des résultats extraits des mesures radar avec ceux classiquement obtenus à partir des mesures optique, est réalisée par l'intermédiaire d'un **paramètre commun** qu'il est possible d'obtenir grâce à l'exploitation d'un caractère **redondant** des données. Suivant le domaine d'étude, la déduction de ce paramètre à partir des mesures sera plus ou moins directe. Dans la première application ce paramètre commun correspond à un indice de végétation, quant à celui utilisé dans la seconde application, il correspond à l'aptitude des mesures à cartographier le manteau neigeux.

La confrontation des informations extraites des mesures n'a pas toujours lieu au niveau du pixel. Cependant même une géolocalisation sommaire est nécessaire, ne serait-ce que pour être sûr de s'intéresser à la même portion de terrain ou au même objet. Pour la première application traitée une simple procédure pour géoréférencer les données originales est suffisante. Les traitements appliqués à l'ensemble de l'image sont ainsi limités. Par contre dans le cadre de la seconde application une superposition au niveau du pixel est requise. Les traitements élaborés s'appliquent alors à la totalité de l'image.

La première application comprend l'étude d'un modèle numérique de croissance végétale. La compétitivité des mesures hyperfréquence/optique a été traitée au sein de ce modèle par l'association de données contemporaines. Une courbe de croissance calculée pour chaque type de données a démontré **l'aptitude des mesures radar à suivre la croissance du végétal**. La comparaison directe des résultats acquis à partir des deux types de mesures a permis aux mesures radar d'acquiescer plus de liberté et d'être considérées comme source d'information majeure. L'étude des caractéristiques individuelles des mesures vis-à-vis du phénomène observé a permis de réaliser une sélection des mesures en fonction du stade de croissance. La répartition temporelle des mesures au cours de l'évolution du phénomène est importante. Ce qui a débouché sur une expérience de fusion de données non contemporaines, pour augmenter la répartition temporelle des mesures. Cette fois-ci, le mélange des mesures aboutit à une seule courbe de croissance, affinée par une meilleure distribution des mesures. L'intégration d'une mesure est choisie en fonction de son aptitude à rendre compte de l'évolution de la croissance du végétal en fonction du temps. Il a été démontré que les mesures radar étaient plus appropriées que les mesures optique en début de croissance.

La seconde application a porté sur un exemple de **fusion de pixel** des images SPOT/ERS sur des régions montagneuses. Elle nous a conduit à développer des algorithmes adaptés aux problèmes rencontrés et ainsi nous a amené à construire des **ortho-images**. La fusion n'a pas été simplement utilisée comme un outil d'analyse finale mais également en tant qu'outil au cours des procédures de conditionnement.

Des efforts ont été consacrés sur l'élaboration d'un modèle géométrique précis pour construire une ortho-image. Le changement de référentiel pour la construction d'une ortho-image SAR, nous a amené à travailler deux points importants.

L'opération de mise en correspondance choisie, inclut une étape de détection d'amers. L'amélioration des techniques manuelles est possible grâce à **l'injection de points d'appui** issus d'une autre source, par exemple une image optique. Cette solution dépend fortement de la scène étudiée,

c'est-à-dire des objets qui la constituent. Si le relief est très accidenté, les nombreux repliements de celui-ci, une fois imagé, ne permettent pas ou peu de détecter des cibles adéquates sur l'image brute radar. Ces cibles sont souvent placées dans les fonds de vallée, et par conséquent masquées sur l'image. Par contre pour des scènes qui présentent une **orographie mixte** (c'est-à-dire avec des montagnes et des plaines), cette démarche permet de gagner en temps et en précision sur la détection des points d'appui.

De plus afin de préserver la qualité radiométrique des données originales, une nouvelle méthode de ré-échantillonnage a été étudiée sur des cas synthétiques. Cette nouvelle technique utilise l'information issue de l'image optique **pour inférer une loi de redistribution des mesures radar** sur une nouvelle grille de représentation. Les résultats obtenus montrent que la **collaboration multicapteur** permet d'affiner le ré-échantillonnage des données en préservant mieux l'information contenue dans l'image brute. La poursuite des recherches pour traiter des cas réels pourrait faire partie des perspectives. Dans cette dernière application, on a mis en avant l'importance de la qualité du modèle numérique de terrain, qui a constitué un facteur limitant.

Les efforts effectués pour promouvoir les images radar se sont épanouis dans le domaine de la fusion de données. La synergie issue des associations d'images SPOT/ERS a été éprouvée. L'arrivée prochaine d'images issues de nouveaux capteurs (ERS2, Radarsat, SPOT5) renforce les motivations pour la continuité de telles études de fusion. L'expérience grandissante du traitement des images radar, permet d'affirmer leur considération parmi un jeu d'images multicapteur. Trop souvent perçus comme des données ancillaires, la validation de leur apport tend à modifier ce statut. Les domaines comme la glaciologie, où les mesures optiques sont déficientes, ont très vite su tirer parti de l'avantage à utiliser des images radar. Mais le développement de traitements adaptés leur permet de s'introduire dans d'autres domaines comme nous l'avons vu par exemple en agronomie ou en cartographie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Acte du colloque de l'optique au radar - Les applications de SPOT ERS, Cépaduès-Editions, Toulouse, France, 574p., 1993.

Alianna, J. M., Pap, R. M., Harston, C. T., A hierarchical data structure representation for fusing multisensor information. SPIE, *Sensor Fusion*, 1100, 162-178, 1989.

Appriou, A., Formulation et traitement de l'incertain en analyse multi-senseurs. In compte-rendus du 14 ème colloque GRETSI, 951-954, Juan les Pins, France, 1993.

Armand, P., Simulation du signal brut rétrodiffusé par des cibles étendues illuminées par un radar à ouverture synthétique. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, France, 157p., 1993.

Bernard-Brunet, J., Jouglet, J. P., Gorius, H., Cartographie thématique des milieux pastoraux en zones de montagne à partir de données satellitaires, aspects méthodologiques. *Bulletin Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 129, pp. 29-34, 1993.

Bouman, B. A. M., A program to calibrate the crop growth model SBFLEVO for sugar beet in Flevoland on optical reflectance and/or radar backscatter data, Centre for Agrobiological Research, report 164, Wageningen, The Netherlands, 1992a.

Bouman, B. A. M., Buker, C., Clevers, J. G. P. W., Van Leeuwen, H. J. C., Uenk, D., Optical component Mac Europe ground truth report Flevoland 1991, Wageningen, The Netherlands, 1992b

Bouman, B. A. M., Hoekman, D. H., Interpretation of C- and X-band radar images over an agricultural area, the Flevoland test site in the Agriscatt-87 campaign. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1577-1594, 1993a.

Bouman, B. A. M., Hoekman, D. H., Multi-temporal, multi-frequency radar measurements of agricultural crops during the Agriscatt-88 campaign in The Netherlands, *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1595-1614, 1993b.

Bouman, B. A. M., Linking X-band radar backscattering and optical reflectance with crop growth models, Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 169p., 1991.

Bouman, B. A. M., Visser, M. A. M., Uenk, D., Agriscatt 88 ground data collection Flevoland (NL), Centre for Agrobiological Research, report 108, Wageningen, The Netherlands, 1988.

Bredow, J. W., Gogineni, S., Comparaison of measurement and theory for backscatter from bare and snow-covered saline ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 4, 456-463, 1990.

Brien, G., Hardarige, J. Ph., Ruckebusch, G., Observation spatiale militaire. *L'onde électrique*, vol. 72, 6, 39-44, 1992.

Buker, C., Clevers, J. G. P. W., Van Leeuwen, Optical component Mac Europe - Optical data report Flevoland 1991, report, Wageningen, The Netherlands, 1992.

Caloz, R., Blaser, T. J., Willemin, G., Création d'une ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude - Influences des modes de ré-échantillonnage radiométrique. Journées scientifiques AUPELF-UREF, 21-23 octobre, Montréal, Canada, 13p., 1991.

Cartographie spatiale de la Terre, CNES, IGN. Cours de technologie spatiale, 643p., 1979.

Castagnas, L., Application of the multiresolution analysis to the fusion of satellite images : example of SPOT and ERS-1 data. In conference proceedings *IEEE/SMC, International conference on systems, man and cybernetics - Systems engineering in the service of humans*, 3, 684-686, Le Touquet, France, 17-20 Octobre, 1993, IEEE n°93CH3242-5, P. O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA, 1993.

Cauneau, F., Pons, I., Castagnas, L., Albuissou, M., Snow cover monitoring in a high altitude mountain using SPOT and ERS data. In proceedings of *The 14th EARSeL symposium : Sensors and environmental applications of remote sensing*, Göteborg, Suède, 6-8 Juin 1994, 259-261, Pub. Balkema, Rotterdam, 500p., 1995.

Cauneau, F., Ranchin, T., Speckle removal in SAR image using the wavelet transform. In *Proc. of the 12th EARSeL symposium : Remote sensing for monitoring the changing environment of Europe*, 97-104, 1992, Winkler ED., Pub. Balkema, Rotterdam, 304 p., 1993.

Cavanié, A., Ezraty, R., Gohin, F., Apports d'ERS-1 à l'observation des glaces de mer à l'échelle océanique. Acte du colloque Les nouvelles frontières de la télédétection océanique, Monaco, 17 décembre 1993, 99-106, Ed. François Doumenge, Mémoires de l'institut océanographique, 18, 124 p., 1994.

Cervelle, B., *SPOT des yeux braqués sur la Terre*. Presse du CNRS, Paris, France, 213p., 1989.

Chavez, P., S., Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24,000 - scale image mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 10, 1637-1646, 1986.

Cihlar, J., Pultz, T. J., Gray, A. L., Change detection with synthetic aperture radar. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 3, 401-414, 1992.

Clément, V., Giraudon, G., Houzelle, S., A knowledge-based interpolation system for fusion of SAR and SPOT images. International Space Year : Space Remote Sensing, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Huston (Texas), USA, 4p., 1992.

Clément, V., Giraudon, G., Houzelle, S., Sandakly, F., Interpretation of remotely sensed images in a context of multisensor fusion using a multi-specialist architecture. Rapport de recherche INRIA N°1768, 35p., 1992.

Clevers, J. G. P. W., Van Leeuwen, H. J. C., Werhoef, W., APAR estimation by means of the WdVI : a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model, report, Wageningen, The Netherlands, 1992.

-
- Curlander, J., Leberl, F., Kruse, F., Geometric ortho-rectification of σ^0 image products from multiple incidence synthetic aperture radar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 4, 111-113, 1992.
- Djamdji, J. P., Analyse en ondelettes et mise en correspondance en télédétection. Thèse de doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 265p., 1993.
- Djamdji, J. P., Bijaoui, A., Maniere, R., Geometrical registration of images : the multiresolution approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, 5, 645-653, 1993.
- Document ESA, ERS-1 special issue. ESA bulletin 65, 130p., 1991.
- Document ESA, Les satellites au service de l'environnement et du développement. 20p., 1992.
- Document GDR TdSI, Groupe de recherche du CNRS : Traitement Du Signal et Images, Synthèse sur les problèmes de fusion. 30p., 1991.
- Domik, G., Leberl, F., Cimino, J., Multiple incidence angle SIR-B experiment over Argentina : generation of secondary image products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24, 4, 492-497, 1986.
- Dowman, I., Quality aspects of geocoded SAR data as input in GIS. *Bulletin Société Française Photogrammétrie et Télédétection*, 122, 24-28, 1992.
- Fitch, J. P., *Synthetic aperture radar*. Springer-Verlag, 170p., 1988.
- Fily, M., Dedieu, J. P., Interprétation en nivologie de l'imagerie radar aéroportée en zone de montagne (les Arcs, Alpes française). *Bulletin Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 129, pp. 4-8, 1993.
- Girard, M., C., Girard, C., M., *Télédétection appliquée zones tempérées et intertropicales*. Masson, 260p., 1989.
- Guide des utilisateurs de données SPOT, CNES, SPOT IMAGE. Manuels de référence Vol 1, 2, 3, 1986.
- Guidon, B., Maruyama, H., Automated matching of real and simulated SAR imagery as a tool for ground control point acquisition. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 12, 149-158, 1986.
- Guignard, J. P., Desnos, Y. L., Brooker, G., Caspar, C., ERS-1 fast delivery reference image. ESA documentation, Nov 8, 23p., 1991.
- Guindon, B., Development of a SAR data acquisition planning tool (SARPLAN) based on image simulation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 2, 333-344, 1993.
- Guindon, B., Method for automated control point acquisition in SAR images. In proceedings of Geosar working group, Synthetic aperture radar image rectification techniques, Proceedings of the first international workshop on image rectification techniques for spaceborne synthetic aperture radar, Dibag Report 29, 14-16 January, Loipersdorf, Austria, 29-32, 1987, Pub., Institute for Image Processing and Computer Graphics, Graz Research Center, Graz, Austria, 108, 1987.
- Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., Goetz, S. J., Radiometric rectification : toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing Environment*, 35, 11-27, 1991.

-
- Harris, J. R., Murray, R., Hirose, T., IHS Transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56, 12, 1631-1641, 1990.
- Hoekman, D. H., The Agriscatt campaign - Radar data acquisition at agricultural sites in five west-european countries during the 1987 and 1988 growing seasons, report, Wageningen, The Netherlands, 1990.
- Houzelle, S., Extraction automatique d'objet cartographiques par fusion d'informations extraites d'images satellites. Thèse de Doctorat en Signal et Image, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 176p., 1993.
- Houzelle, S., Giraudon, G., Data fusion using SPOT and SAR images for bridge and urban area extraction. In proceedings IGARSS'91, Helsinki, Finlande, 3-6 June, 1991.
- Jakob, J., Chapman, B. D., Dubois, P., Shi, J., The effect of topography on SAR calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31, 5, 1036-1043, 1993.
- Johnsen, H., Lauknes, L., Guneriussen, T., Geocoding of fast-delivery ERS-1 SAR image mode product using DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 11, 1957-1968, 1995.
- Karam, M. A., Fung, A. K., Lang, R. H., Chauhan, N. S., A microwave scattering model for layered vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 4, 767-784, 1992.
- Kropatsch, W. G., Strobl, D., The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, 1, 98-107, 1990.
- Kwok, R., Curlander, J. C., Pang, S. S., Rectification of terrain induced distortions in radar imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 5, 507-513, 1987.
- Laur, H., Derivation of backscattering coefficient σ_0 in ERS-1 SAR PRI products. ESA/ESRIN report, Issue 1, Rev. 0, 17th october, 16p., 1992.
- Leberl, F. W., *Radargrammetric image processing*. Artech House, 500p., 1990.
- Lefèvre, V., Phillip, S., Système multi-agent d'interprétation d'images multi-capteurs. Séminaire CNRS - Fusion en imagerie aérienne et satellitaire, groupe TdSI, Sophia Antipolis, France, 1994.
- Leroy, M., Capteurs imageurs optiques. Cours de DEA "Méthodes Physiques en télédétection", 200p., 1991.
- Mangolini, M., Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteur au niveau du pixel en télédétection et photo-interprétation. Thèse de Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 174p., 1994.
- Mangolini, M., Ranchin, T., Wald L., Fusion d'images SPOT multispectrale (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. In actes du colloque De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS, 199-209, Cépaduès-Edition, Toulouse, France, 574p., 1993.
- Mangolini, M., Ranchin, T., Wald, L., Evaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *Bulletin Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 137, pp. 24-29, 1995.

Mangolini, M., Wald, L., Ranchin, T., Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. 199-209, In *De l'optique au radar - Les applications de SPOT ERS*, Cépaduès-Editions, Toulouse, France, 574p., 1993.

Manore, M., The canadian experience with ERS-1 imagery for sea ice applications. In *Abstracts First ERS-1 symposium Space at the service of our environment*, 92-93, Cannes, France, Nov 1992, ESA publication, Paris, France, 1, 252p., 1992.

Méaille, R., Wald, L., Using information system and satellite imagery within a numerical simulation of regional urban growth. *International Journal Geographical Information Systems*, 4, 4, 445-456, 1990.

Murphy, H. A., Haykin, S., Bayesian classification of surface-base ice radar images. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, OE12, 3, 493-502, 1987.

Naraghi, M., Stromberg, W., Daily, M., Geometric rectification of radar imagery using digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 2, 195-199, 1983.

Massonet, D., Perlant, F., Rabaute, T., Précision et niveau d'artéfacts dans les calculs de modèles numériques de terrain par interférométrie. 511-523, In *De l'optique au radar - Les applications de SPOT ERS*, Cépaduès-Editions, Toulouse, France, 574p., 1993.

Novak, K., Rectification of digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 3, 339-344, 1992.

Pau, L., F., Sensor data fusion. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1, 103-116, 1988.

Peddle, D. R., Franklin, S. E., Multisensor evidential classification of surface cover and frozen ground. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 17, 3375-3380, 1992.

Pénicand, C., Rudant, J. P., Nezry, E., Utilisation opérationnelle des images de télédétection radar pour la cartographie. *Bulletin Société Française Photogrammétrie et Télédétection*, 137, 35-41, 1995.

Perlant, F., Example of SPOT/ERS-1 complementarity. In *proceedings of First ERS-1 symposium Space at the service of our environment*, 563-568, Cannes, France, Nov 1992, ESA publication, Paris, France, 1, 252p., 1992.

Polidori, L., Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. *Bulletin Société Française Photogrammétrie et Télédétection*, 139, 10-19, 1995.

Polsky W., D., Stennis center targets agricultural imagery market. *Space News*, January 17-23, 1994.

Raggam, J., Relevant parameters in the reconstruction of the analytic SAR sensor model. Geosar working group, Synthetic aperture radar image rectification techniques, Proceedings of the first international workshop on image rectification techniques for spaceborne synthetic aperture radar, Bibag Report 29, 14-16 January, Loipersdorf, Austria, 33-39, 1987, Pub., Institute for Image Processing and Computer Graphics, Graz Research Center, Graz, Austria, 108, 1987.

Ranchin, T., Application de la transformée en ondelette et de l'analyse multirésolution au traitement d'images de télédétection. Thèse de Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 146p., 1993.

-
- Ranchin, T., Interpolation spatiale dans les images satellitales. Mémoire de DEA, Université de Nice - Sophia Antipolis, 35p., 1991.
- Ranchin, T., Wald, L., Fusion of images and raster-maps of different spatial resolution by incrustation : an improved approach. *Computer Environment and Urban Systems*, 19, 2, 77-87, 1995.
- Renouard, L., Perlant, F., Geocoding SPOT products with ERS-1 SAR geometry. In Proceedings Second ERS-1 symposium - Space at the service of our environment, 653-658, 11-14 october, Hambourg, Germany, ESA SP 361, 1993.
- Riccitiello, R., Remote-Sensing project targets key european crop. *Space News*, July 12-18, 1993.
- Richelson, J., T., *America's secret eyes in space*. Harper Business, 375p., 1990.
- Rudant, J. P., La Guyane à travers les nuages : première couverture satellitaire globale. Bulletin trimestriel, Observation de la Terre, N44, juin 1994.
- Schmidlin, V., Favier, G., Stromboni, J. P., Réseaux de neurones et fusion de données. In comptes-rendus du 14ième colloque GRETSI, 991-994, Juan les Pins, France, 1993.
- Schreier, G., Kosmann, D., Roth, A., Design aspects and implementation of a system for geocoding satellite SAR images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 45, 1-16, 1990.
- Spitters, C. J. T., van Keulen, H., van Kraailingen, D. W. G., A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87. In *Simulation and systems management in crop protection*. Ed. Rabbinge, 420p., 1989.
- Steffen, K., Maslanik, J. K., Barry, R., Weaver, R., Comparison of ERS-1 SAR and Landsat Thematic Mapper for thin ice mapping. In Proceedings *First ERS-1 symposium Space at the service of our environment*, 361-365, Cannes, France, Nov 1992, ESA publication, Paris, France, 1, 518p., 1993.
- Sylvander, S., Gigord, P., Exploitation des images radar ERS 1 : les premiers résultats. 1er colloque franco-allemand sur l'observation de la Terre - application terrestre : du besoin à l'instrument, Bonn, 1995.
- Taket, N. D., Howarth, S. M., Burge, R. E., A model for the imaging of urban areas by Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29, 3, 433-443, 1991.
- Toutin, T., Carbonneau, Y., St Laurent, L., An integrated method to rectify airborne radar imagery using DEM. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 4, 417-422, 1992.
- Toutin, T., Intégration d'images multi-sources : premiers résultats avec SPLOT-PLA et radar aéroporté. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20, 1, 79-82, 1994.
- Van den Berghe, F., Assimilation de mesures satellitaires dans des modèles numériques par méthodes de contrôle optimal. Thèse de doctorat en Sciences et Techniques, Ecole des Mines de Paris, 1992.
- Van Der Sanden, J. J., Visser, M. A. M., Ground truth collection for the JPL-SAR and ERS-1 campaign in Flevoland and the Veluwe (NL) 1991, report 31, Wageningen, The Netherlands, 1992.
- Van Kasteren, H. W. J., Description of the ROVE database, Centre for Agrobiological Research, report 176, Wageningen, The Netherlands, 1993.

Van Leeuwen, H. J. C., Clevers, J. G. P. W., Synergy between optical and microwave remote sensing for crop growth monitoring. In *Proceedings of The sixth international symposium physical measurements and signatures in remote sensing*, Val d'Isère, France, 17-21 January, 1994.

Van Leeuwen, H. J. C., Synergy and modelling with optical and microwave remote sensing for agricultural application. Thesis, to be published in 1995. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

Wong, F., Orth, R., Friedmann, D. E., The use of terrain model in the rectification of satellite-borne imagery. In *proceedings of Fifteenth international symposium on remote sensing of environment*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, 653-662, May, 1981.

DE LA SYNERGIE DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT/ERS AU TRAVERS DE DEUX EXEMPLES DE FUSION

Les domaines du spectre électromagnétique utilisées par les capteurs imageurs satellitaires (passifs ou actifs) s'étendent aujourd'hui de l'optique aux hyperfréquences. Il est très vite apparu intéressant d'étudier la synergie issue du regroupement de ces images multisource. Le travail présenté, porte sur la fusion d'images SPOT/ERS et plus particulièrement sur l'étude de différentes stratégies de fusion. L'application à laquelle sont destinées les images est prépondérante car elle spécifie le conditionnement et la stratégie à suivre pour les associer. Deux applications visant à démontrer l'apport de l'imagerie radar, d'une part dans le domaine de l'agronomie, et d'autre part dans le domaine de l'enneigement, ont été étudiées.

Le premier exemple abordé porte sur la fusion d'attribut ; celle-ci est réalisée au sein d'un modèle numérique de croissance végétale. L'accent est mis sur l'interprétation thématique effectuée sur des attributs qui sont extraits à partir des mesures. Une première exigence : justifier la prise en compte des mesures radar en quantifiant le gain apporté par l'opération de fusion. L'expérience acquise pour l'interprétation des mesures optique sert de référence pour analyser les conclusions tirées de l'interprétation des mesures radar. On évalue aussi l'apport d'une mesure vis-à-vis d'une autre mesure de nature différente. Un premier test utilisant des mesures mixtes contemporaines a permis de comparer les conclusions tirées des deux jeux de mesures traités en parallèle. A l'issue de ce travail, les mesures radar ayant montré leur intérêt, un nouveau test a été effectué avec des données mixtes non-contemporaines. L'assimilation des données mixtes (optique/radar) est gérée par le paramètre temps et le suivi de la croissance du végétal est amélioré par une répartition temporelle plus fine due à la multiplicité des mesures. De plus comme l'aptitude d'une mesure à rendre compte du stade de croissance de la culture varie au cours du temps, il est possible de choisir la mieux adaptée pour un instant donné.

Le second exemple concerne la fusion au niveau du pixel. Dans ce cas on s'intéresse à l'interprétation pixel par pixel de la scène, ce qui demande une superposition exacte des différentes images et des données extérieures prises en compte au sein du processus de fusion. L'étendue des applications faisant appel à ce type de fusion est considérable. Cependant, dans certaines régions, le relief très accidenté limite l'utilisation de l'imagerie radar. On constate un manque d'outils adaptés pour traiter les déformations géométriques et radiométriques rencontrées dans ce cas. Une chaîne de traitement pour construire des ortho-images a été élaborée. Ainsi la modélisation géométrique et la modélisation radiométrique d'une mesure SAR ont été traitées. Certaines étapes ont été spécialement travaillées : la détection des points d'appuis et le ré-échantillonnage d'une grille irrégulière. L'amélioration de ces deux points a été possible grâce à une collaboration multicapteur. En effet, la fusion est mise à profit dès le départ, lors du conditionnement des images, et non plus réservée pour l'analyse finale effectuée sur les informations déjà superposées. Ainsi, des ortho-images SAR acquises en phase ascendante et descendante sur la région de Briançon ont été construites pour une application dont l'objectif est d'identifier l'apport du SAR pour cartographier le manteau neigeux.

La reconnaissance de l'apport des images radar, au sein des applications thématiques, favorisent leur utilisation. L'analyse conjointe des images multispectrale optique/hyperfréquence offre de nouvelles perspectives quant à la réalisation de certaines applications. La création de processus de fusion permet d'exploiter au mieux la synergie qui découle de tels regroupements. Des stratégies adaptées sont développées pour satisfaire aux spécificités de l'ensemble des données, et pourvoir à la mise à jour de résultats originaux.

Mots clés : Fusion de données : stratégie et synergie ; Imagerie Satellitaire optique/hyperfréquence ; Ortho-images SPOT/ERS sur un relief accidenté ; modélisation géométrique et radiométrique de mesures SAR.
