



HAL
open science

Extraction 3-D de structures industrielles sur des images RAMSES haute résolution par radargrammétrie

Elisabeth Simonetto

► To cite this version:

Elisabeth Simonetto. Extraction 3-D de structures industrielles sur des images RAMSES haute résolution par radargrammétrie. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Rennes 1, 2002. Français. NNT: . tel-00749513

HAL Id: tel-00749513

<https://theses.hal.science/tel-00749513>

Submitted on 7 Nov 2012

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.

N° Ordre : 2673
de la thèse

THESE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES 1

pour obtenir

le grade de : *DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES I*

Mention : **TRAITEMENT du SIGNAL**

PAR

Elisabeth SIMONETTO

Equipe d'accueil : ONERA / DTIM - IOR, Châtillon

Ecole doctorale : MATISSE, Rennes

Laboratoire du directeur de Thèse : ENSTBr - ITI, Brest

**EXTRACTION 3-D DE STRUCTURES INDUSTRIELLES
SUR DES IMAGES RAMSES HAUTE RESOLUTION
PAR RADARGRAMMETRIE**

SOUTENUE LE 30 avril 2002 devant la commission d'Examen

COMPOSITION DU JURY :

Gérard FAUCON

Mihai DATCU

Florence TUPIN

René GARELLO

Hélène ORIOT

Eric POTTIER

Frédéric ADRAGNA

Jean-Marc Le CAILLEC

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Membre invité

Membre invité

Remerciements

Cette thèse a été financée par l'ONERA et s'est déroulée dans l'Unité Traitement d'Image à Châtillon.

Je tiens tout d'abord à remercier René Garello qui a accepté d'être mon directeur de thèse. Malgré la distance entre Paris et Brest, ses conseils judicieux m'ont beaucoup aidée et son accueil chaleureux lors de mes visites à Brest me laissera un agréable souvenir.

Je remercie vivement Florence Tupin et Mihai Datcu pour avoir bien voulu être rapporteurs de cette thèse. J'en suis d'autant plus heureuse qu'ils ont tous deux montré un intérêt certain pour mes travaux et m'ont encouragée à l'occasion de nos quelques échanges. Je remercie Gérard Faucon, Eric Pottier, Frédéric Adragna et Jean-Marc Le Caillec de m'avoir fait l'honneur de participer au jury. Un grand merci à Gérard Faucon qui a présidé le jury. Je suis également très reconnaissante à Jean-Marc Le Caillec pour sa disponibilité lors de mes venues à Brest et pour ses conseils pertinents.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Hélène Oriot qui m'a épaulée durant toute la durée de cette thèse. Ses précieux conseils, aussi bien scientifiques que pratiques, m'ont permis d'avancer efficacement, ce qui a rendu ce travail très motivant et enrichissant. Outre ses encouragements et son soutien, je la remercie sincèrement pour sa confiance et sa complicité.

Je remercie Gilles Foulon et Alain Michel pour m'avoir accueillie à l'ONERA. Un grand merci à Alain Michel pour sa gentillesse à mon égard. Je ne saurais oublier Fabrice Savignol qui m'a facilité bien des tâches logistiques et dont la bonne humeur m'a bien détendue. Je remercie Fabrice Janez et Guy Le Besnerais qui ont pris le temps de répondre à toutes mes questions et pour leur relecture très attentive du manuscrit. Je remercie également Dominique Gillieron pour sa relecture du manuscrit, ainsi que Sébastien Dauve et M. Magnan pour leur relecture de la partie concernant l'imagerie radar.

Ces années passées à l'ONERA ont été agréables et je remercie les collègues de l'unité pour les bons moments passés et leur disponibilité. Je tiens à remercier en particulier Patrick Secchi et Fabien Vignon de leur aide lorsque j'ai eu des problèmes informatiques. Je remercie Vincent Samson pour sa relecture d'une bonne partie de la thèse et sa complicité. Merci à Philippe Cornic, Marc Contat, Martial Sanfourche, Gilles Rochefort, Julien Verliac, Anne Beaupère, Olivier Poirel, Marie-Lise Duplaquet, Stéphane Herbin et Frédéric Champagnat. Je salue également d'anciens doctorants : Brigitte Fauvet que je remercie pour ses conseils avertis et ses encouragements et Laurent Fouque pour sa sympathie et son aide sur l'algorithme de classification.

Enfin, je remercie bien sûr mes parents et mes frères, Emmanuel et Rénald, qui m'ont encouragée et supportée ! Leurs conseils m'auront beaucoup appris. J'adresse enfin mes plus tendres pensées à mon cher Stéphane qui m'a soutenue courageusement pendant ces quelques années.

Résumé

Cette thèse concerne l'élaboration d'une chaîne de traitements radargrammétrique conduisant aux structures 3-D à partir d'images radar haute résolution. L'intérêt de la cartographie 3-D par imagerie RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) est que l'image radar peut être acquise par tout temps et de jour comme de nuit. Nous disposons d'images issues du capteur expérimental RAMSES de l'ONERA et représentant des scènes industrielles. Ces données contiennent de nombreux échos forts et les toits des structures sont peu visibles. Ces phénomènes rendent difficile l'interprétation des images et insuffisantes les méthodes classiques de reconstruction 3-D. Face à ces particularités, nous menons l'analyse radiométrique et géométrique des données. Cette analyse aboutit à la proposition d'une chaîne algorithmique adaptée qui vise à restituer les structures cylindriques et parallélépipédiques telles que cuves et bâtiments de forme simple. Dans la première partie concernant l'analyse, nous donnons l'interprétation simplifiée de l'image radar d'une structure et étudions les statistiques des images d'amplitude. L'opportunité de la radargrammétrie haute résolution est vérifiée théoriquement puis expérimentalement. La seconde partie présente la chaîne radargrammétrique. Notre approche comprend deux étapes principales : l'extraction des structures à partir des échos forts puis l'estimation du 3-D. L'extraction des structures fait l'objet d'un chapitre important de cette thèse. Nous proposons une méthode permettant la reconnaissance de la forme englobant la structure brillante, circulaire ou rectangulaire, par optimisation d'un critère surfacique. Nous la comparons avec des techniques plus classiques de traitement d'images et étudions plusieurs critères ainsi que l'apport de méthodes d'optimisation stochastique. Nous présentons ensuite une méthodologie pour obtenir les altitudes du sol entre les structures extraites et leur hauteur. Les résultats montrent la pertinence de l'approche lorsque la structure a été détectée et dans le cas favorable où un écho du toit est détectable.

Mots clés : imagerie aérienne, RSO, haute résolution, extraction, bâtiments, 3-D, radargrammétrie, reconnaissance de forme

Abstract

The purpose of this work is to build a radargrammetric chain leading to the 3-D structures from high resolution SAR (Synthetic Aperture Radar) images. High resolution 3-D maps obtained by SAR imaging are interesting because of their all-weather character. The data we use, are acquired by the experimental airborne RAMSES sensor of ONERA and represent industrial areas. These images contain a lot of strong echoes and structure roofs are not always sharply marked. These phenomena make difficult the image interpretation and unsuitable the classical methods of 3-D extraction. Then we first propose a radiometric and geometrical analysis of the data. This analysis leads to an adapted algorithmic chain that aims at recovering cylindrical structures and parallelepipeds, such as tanks and rectangular buildings. In the first part concerning the analysis, we present the simplified radar image interpretation on structures and study the statistics of amplitude images. The opportunity of high resolution radargrammetry is also checked theoretically then experimentally. The second part deals with the radargrammetric chain. Our approach consists into two main steps: structure extraction from strong echoes then 3-D estimation. The structure extraction represents an important part in this work. We propose a method including the recognition of the best circular or rectangular pattern including the strong structure by an area-based criterion optimization. We compare it with more classical methods of image processing and study several criteria and stochastic optimization techniques. Then, we present a method for the computation of ground altitudes between structures and their height. The results show the pertinence of our approach when the structure is well detected and in the best case where a roof echo is detectable.

Key words : airborne imaging, SAR, high-resolution, building extraction, 3-D, radargrammetry, pattern recognition

Table des matières

PRINCIPALES NOTATIONS ET ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION	15
PARTIE 1: ANALYSE	
<hr/>	
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DES IMAGES RADAR	21
I. IMAGERIE RSO.....	22
I.1. Synthèse des images radar	22
I.1.1. Généralités sur l'acquisition	22
I.1.2. Traitement SAR.....	25
I.1.3. Limitations	29
I.1.4. Paramètres dimensionnants	29
I.2. Modélisation géométrique de l'acquisition.....	30
I.2.1. Localisation de points.....	30
I.2.2. Projections	32
I.2.3. Distorsions dues aux effets du relief	34
I.3. Les effets spéculaires	34
I.3.1. Critère de Rayleigh.....	34
I.3.2. Effets miroirs, effets dièdres et trièdres.....	36
I.3.3. Conséquences pour la cartographie de bâtiments.....	36
I.3.4. Généralisation à l'étude du bâti.....	38
I.4. Modèles statistiques en radar	42
I.4.1. Cas du fouillis homogène	42
I.4.2. Modèles en zone hétérogène	45
I.4.3. Corrélacion spatiale du speckle	48
II. IMAGES RAMSES	49
II.1. Présentation des données	49
II.1.1. Données	49
II.1.2. Interprétation d'images de structures.....	53
II.2. Etude statistique des images RAMSES	56
II.2.1. Dynamique et seuillage.....	56
II.2.2. Lois statistiques des images	56
III. CONCLUSION	60
CHAPITRE 2 : ANALYSE STÉRÉOSCOPIQUE	63

I. ETAT DE L'ART SUR L'EXTRACTION DU 3-D	64
I.1. La stéréoscopie radar	64
I.1.1. Modélisation géométrique.....	64
I.1.2. Etat de l'art sur la mise en correspondance d'images stéréoscopiques	69
I.2. Extraction du 3-D en radar haute résolution	75
I.2.1. Etudes monoscopiques	76
I.2.2. Etudes interférométriques	77
I.2.3. Autres techniques	79
II. MESURE DU POTENTIEL STÉRÉOSCOPIQUE EN RADAR.....	80
II.1. Mesure de potentialité dans la littérature.....	80
II.2. Modélisation des erreurs de localisation.....	81
II.2.1. Méthode	81
II.2.2. Modèle d'erreurs des paramètres.....	82
II.2.3. Modèle d'erreurs de mise en correspondance	83
II.3. Interprétation du modèle d'erreurs	83
II.3.1. Rappel du cas de trajectoires parallèles et d'angles Doppler nuls.....	84
II.3.2. Influence des angles stéréo et d'intersection - validation du modèle	86
II.4. Comparaison des mesures monoculaires et stéréoscopiques.....	89
II.4.1. Mesure par l'ombre.....	89
II.4.2. Mesure par le repliement	89
II.5. Evaluation des configurations RAMSES	90
III. ANALYSE DE L'INFORMATION 3-D SUR LES ÉCHOS FORTS DES STRUCTURES	91
III.1. Etude sur des pylônes.....	91
III.2. Etude pour un gazomètre.....	92
III.2.1. Interprétation simplifiée	93
III.2.2. Extraction des échos	93
III.2.3. Mise en correspondance des échos	94
III.2.4. Validation	94
IV. CONCLUSION	95

PARTIE 2: PROPOSITION D'UNE CHAÎNE ALGORITHMIQUE EN RADARGRAMMETRIE HAUTE RESOLUTION

CHAPITRE 3 : EXTRACTION DE STRUCTURES INDUSTRIELLES ..99

I. PROBLÉMATIQUE.....	100
I.1. Position du problème	100
I.2. Démarche	101

I.3. Conservation des formes dans l'image géoréférencée.....	101
II. EXTRACTION DES STRUCTURES BRILLANTES PAR FUSION.....	102
II.1. Détection des structures brillantes circulaires et linéaires.....	103
II.1.1. Choix du détecteur.....	103
II.1.2. Choix des seuils.....	104
II.1.3. Post-traitement.....	104
II.2. Masque binaire par fusion.....	105
II.2.1. Fusion de la classification et de la détection des structures brillantes.....	105
II.2.2. Exemples de masques binaires.....	105
III. EXTRACTION DES CUVES.....	106
III.1. Extraction des cuves par transformée de Hough.....	107
III.1.1. Rappels sur la transformée de Radon et la transformée de Hough.....	107
III.1.2. Etudes des algorithmes de TH circulaire 3-D et 2-D.....	110
III.1.3. Résultats sur l'extraction des cuves par TH 3-D et 2-D.....	117
III.1.4. Conclusion sur la TH pour les cuves.....	119
III.2. Extraction des cuves par optimisation d'un critère surfacique.....	119
III.2.1. Segmentation d'images radar par optimisation d'un critère statistique.....	119
III.2.2. Description de l'algorithme de reconnaissance de forme par optimisation d'un critère surfacique (AROCS).....	120
III.2.3. Méthode d'optimisation des paramètres.....	125
III.2.4. Etudes des performances.....	132
III.2.5. Résultats sur l'extraction des cuves par AROCS-AG ou AG2.....	137
III.3. Conclusion sur les cuves.....	140
IV. EXTRACTION DES BÂTIMENTS.....	141
IV.1. Démarche.....	141
IV.2. Détection des bâtiments par TH.....	142
IV.2.1. Application de la TH à la détection de droites.....	142
IV.2.2. Détection de lignes par algorithme de TH globale.....	143
IV.2.3. Détection de croix/T/coins par algorithme de TH locale modifiée.....	144
IV.2.4. Conclusion sur la TH pour les bâtiments.....	147
IV.3. Extension de l'AROCS aux bâtiments.....	147
IV.3.1. Algorithme.....	147
IV.3.2. Méthode d'optimisation des paramètres.....	148
IV.4. Résultats sur les bâtiments.....	150
IV.5. Conclusion sur les bâtiments.....	152
V. CONCLUSION.....	153
CHAPITRE 4 : ESTIMATION DU 3-D PAR STÉRÉOSCOPIE.....	155
I. PRÉSENTATION DE L'APPROCHE.....	156

II. CHOIX DE LA FONCTION DE SIMILARITÉ	158
II.1. Fonctions de corrélation	159
II.1.1. Corrélateurs classiques.....	159
II.1.2. Corrélateurs spécifiques en radar	159
II.2. Comparaison des corrélateurs pour les images RAMSES.....	161
II.2.1. Critères testés	162
II.2.2. Calcul de performance	162
II.3. Conclusion de l'analyse sur les corrélateurs.....	165
III. EXTRACTION DES STRUCTURES EN STÉRÉOSCOPIE	165
III.1. Sélection des primitives candidates à l'appariement.....	165
III.2. Appariement des primitives d'initialisation	166
III.2.1. Principe de la mise en correspondance par programmation dynamique.....	166
III.2.2. Application à l'appariement des primitives d'initialisation.....	167
III.3. Reconnaissance des formes en stéréoscopie	167
III.3.1. Extension de l'AROCS au cas multi-image	167
III.3.2. Variation de la disparité à altitude constante dans l'image géoréférencée	168
III.4. Empreintes grossières sur les structures	169
IV. CALCUL DU 3-D	170
IV.1. Altitudes du sol entre les structures extraites.....	170
IV.1.1. Disparités par algorithme de mise en correspondance pyramidal	170
IV.1.2. Altitudes par calcul stéréoscopique et post-traitements	171
IV.2. Hauteurs des structures détectées et MNE.....	171
IV.2.1. Méthode.....	171
IV.2.2. Mesures stéréoscopiques	173
IV.2.3. Mesure monoscopique.....	173
V. RÉSULTATS.....	174
V.1. MNE sur la scène des cuves	174
V.1.1. Extraction stéréoscopique.....	174
V.1.2. MNT	175
V.1.3. MNE	176
V.2. MNE sur la scène des bâtiments.....	177
V.2.1. Extraction stéréoscopique.....	178
V.2.2. MNT	182
V.2.3. MNE	183
VI. CONCLUSION	186
CONCLUSION GÉNÉRALE	189

ANNEXES	193
ANNEXE A. Systèmes SAR imageurs	
ANNEXE B. Estimation statistique de paramètres	
ANNEXE C. Réalités terrain	
ANNEXE D. Classification ICE-MPM-GEMI	
ANNEXE E. Compléments sur l'analyse stéréoscopique	
ANNEXE F. Simulation d'images de demi-couronnes brillantes	
ANNEXE G. Illustration sur la détection de segments par TH locale	
LISTE DES PUBLICATIONS	213
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	215

Principales notations et abréviations

Abréviations diverses

CPDV	Conditions de Prise de Vue
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
RSO	Radar à Synthèse d'Ouverture
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SER	Surface Equivalente Radar
pfa	probabilité de fausse alarme
pd	probabilité de détection
ddp	densité de probabilité
MM	Méthode des Moments
MMI	Méthode des Moments d'ordres Inférieurs
MV	Maximum de Vraisemblance
MAP	Maximum <i>A Posteriori</i>
RMS	Root Mean Square (écart-type)

Abréviations relatives à l'extraction des structures

DL1	détecteur de structures linéaires basé sur le détecteur de contours D1
DL2	détecteur de structures linéaires basé sur le détecteur de contours D2
DF	détecteur fusion de DL1 et DL2
P_d	probabilité de bonne détection
P_m	taux de mauvaise détection
T	mesure fusion de P_d et P_m
TH ou HT	Transformée de Hough
TR	Transformée de Radon
AROCS	Algorithme de Reconnaissance de forme par Optimisation d'un Critère Surfaique
AG	Algorithme Génétique
RE	Recherche Exhaustive
MR	Multi-Résolution
OS	Optimisation Séquentielle

Notations liées au système radar

τ	durée de l'impulsion ou angle Doppler
λ	longueur d'onde
F_c	fréquence d'échantillonnage en distance
PRF	fréquence de répétition des impulsions
δ_a	résolution en azimut
δ_r	résolution en distance
NR	portée proximale
V, V_t	vitesse instantanée du porteur
S, S_t	position instantanée du porteur
H	altitude du porteur
θ_i	angle d'incidence local
r	distance antenne-cible
h	altitude de la cible
dh	altitude relative de la cible par rapport au sol (hauteur)
TD_a	pas en azimut dans l'image radar

TD	pas en distance dans l'image radar
TDS	taille du pixel dans l'image géoréférencée
ps	unité pixel au sol : $1 ps = TDS$ mètres
pr	unité pixel radar : $1 pr = TD$ mètres

Notations liées au modèle statistique radar

R, r	réflectivité sous-jacente, variable aléatoire et réalisation
S, s	speckle, variable aléatoire et réalisation
I, i	intensité, variable aléatoire et réalisation
A, a	amplitude, variable aléatoire et réalisation
ϕ, φ	phase, variable aléatoire et réalisation
μ_u	moyenne de la variable u ou premier paramètre de la loi Lognormale
σ_u^2	variance de la variable u ou second paramètre de la loi Lognormale
γ_u^2	coefficient de variation de u
$E(U)$	espérance de la variable aléatoire U
L_{eq}	nombre de vues équivalent

Introduction

L'utilisation de l'imagerie RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) répond à des besoins d'interprétation de sites dans des conditions peu favorables. En effet, le radar est un capteur actif et permet d'acquérir une image par tout temps et de jour comme de nuit. En basse résolution, l'image radar est utilisée pour de multiples applications sur divers types de terrains : campagnes, villes, forêts, montagnes, océans, côtes et pôles. L'apport de l'image radar pour l'analyse de ces régions n'est plus à démontrer : elle est fort utile pour effectuer l'étude géologique des sols, la détection et le suivi des risques géologiques et des inondations, l'analyse de la surface des océans ou la cartographie. Elle permet aussi d'observer le développement des villes, des cultures et des forêts. Face à ces nombreuses applications de télédétection, le traitement de l'image radar se développe considérablement depuis les premiers RSO spatiaux dans les années 1970. Avec les nouveaux capteurs aéroportés RSO, la récente disponibilité des images radar haute résolution a engendré un essor des travaux de recherche sur ces données. En haute résolution, les images permettent en particulier la visualisation du bâti. Cette thèse a pour cadre d'étude l'extraction 3-D de structures sur de telles données. L'objectif est d'élaborer une chaîne de traitements conduisant au Modèle Numérique d'Élévation (MNE), composé du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et d'une modélisation 3-D des objets du sursol.

La cartographie 3-D des sites apporte une information précieuse, que ce soit en basse ou en haute résolution. La production de MNT par imagerie radar commence dans les années 1980 sur des données spatiales. Les principes d'extraction du 3-D sont cependant antérieurs aux premiers résultats publiés. En basse résolution, trois techniques principales existent : la radargrammétrie utilisant des images stéréoscopiques, l'interférométrie exploitant la différence de phase entre deux acquisitions proches, et la radarclinométrie, fondée sur la modélisation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la pente du terrain. En haute résolution, les expériences en interférométrie ont commencé dans les années 1995 avec des méthodes manuelles ou semi-automatiques sur des zones peu denses. L'obtention automatique du MNE interférométrique est difficile à cause des effets de repliement et en est encore au stade de la recherche. Néanmoins, il semble que les avancées dans le domaine dépendent des images utilisées, c'est-à-dire des paramètres dimensionnants du capteur. Par ailleurs, l'hypothèse de speckle totalement développée utilisée dans la radarclinométrie rend cette méthode inadaptée sur la plupart des surfaces composant le bâti. A notre connaissance, la radargrammétrie n'a pas encore été testée avant le commencement de cette thèse. Une quatrième méthode est utilisée en haute résolution : la mesure monoscopique. Elle fournit les hauteurs des structures par rapport au sol et ne permet donc pas de construire un MNE absolu. Dans ce contexte, nous nous intéressons à la radargrammétrie. Cette technique est intéressante par rapport à la mesure monoscopique lorsqu'un MNE en absolu est nécessaire et représente une alternative ou un complément à l'interférométrie. La radargrammétrie est fondée sur une prise de vues stéréoscopiques de la scène, la mise en correspondance des images et le calcul 3-D. En outre, l'étape difficile de mise en correspondance bénéficie des résultats de la recherche sur la stéréovision en imagerie optique et de l'expérience acquise sur les images radar basse résolution à partir des années 1990 en particulier avec RADARSAT.

Compte-tenu de la complexité des images radar haute résolution, les études existantes concernent surtout des objets simples tels que les bâtiments isolés et les zones semi-urbaines ou industrielles contenant des structures de grande taille. L'extraction 3-D sur ces scènes se heurte à des problèmes communs à l'imagerie optique et radar. Ainsi, la densité des structures, même si elle est moins importante qu'en urbain, induit des parties cachées et des ambiguïtés d'interprétation. De plus, entre

deux dates d'acquisition, certains objets sont susceptibles de se déplacer tels que les véhicules ou même les éléments d'infrastructures mobiles tels que les toits flottants sur des cuves. A ces difficultés s'ajoutent des particularités propres au radar, de types radiométriques, géométriques et physiques. Tout d'abord, le bruit des images ou speckle détériore leur lisibilité. L'effet de repliement des structures verticales, causé par la géométrie d'acquisition, pose des problèmes d'interprétation. En effet, certains pixels mélangent à la fois des rétrodiffusions du sol et du toit de la structure. Le facteur le plus gênant reste cependant les phénomènes spéculaires. Les réflexions spéculaires se produisent sur les surfaces lisses au sens de la longueur d'onde, ce qui est le cas pour la plupart des surfaces artificielles - métal, ciment, bitume, etc. Ces différents phénomènes engendrent sur les images radar de nombreux échos forts et des parties manquantes que l'on appelle des 'non-vus'. Dans le cadre de notre travail, nous décidons d'analyser la capacité des images radar seules à fournir une information 3-D.

Les images radar à partir desquelles nous menons notre analyse sont des images d'amplitude stéréoscopiques issues du capteur expérimental RAMSES (Radar Aéroporté Multi-Spectral d'Etudes de Signatures) de l'ONERA. Ces images, copolaires en bande S ou X, représentent des scènes industrielles. Une rapide observation montre que les toits et les ombres n'apparaissent pas toujours (figure 1). Les échos forts sont, par contre, très nombreux. La majorité des bâtiments rectangulaires apparaissent sous forme de 'L' brillants et les cuves par un ou plusieurs arcs de cercle brillants.



figure 1 : exemple d'image radar RAMSES copolaire en bande S sur des bâtiments

Les algorithmes classiques de mise en correspondance donneront sur ce type d'images un MNE assez régulier qui indique majoritairement l'altitude du sol. Seuls quelques bâtiments aux toits texturés sont partiellement restitués. Dans un premier temps, nous nous attachons à expliquer ce résultat et à étudier l'opportunité de la radargrammétrie haute résolution et la pertinence de l'information 3-D fournie par ces images. Suite aux conclusions de cette analyse, nous proposons une chaîne de traitements adaptée visant à restituer des objets 3-D cylindriques et parallélépipédiques pour modéliser les cuves et les bâtiments rectangulaires. Elle comprend deux grandes étapes : l'extraction des structures puis du 3-D. Sur nos images, l'extraction des structures ne semble possible, dans la majorité des cas, qu'à partir des échos forts. Cette problématique est nouvelle, c'est pourquoi nous y consacrons une part importante dans cette thèse. L'approche que nous avons suivie consiste à rechercher des formes génériques simples, circulaires et rectangulaires. L'extraction du 3-D utilise les techniques radargrammétiques c'est-à-dire la mise en correspondance de points et de primitives et le calcul stéréoscopique. Nous verrons que la mesure monoscopique se révèle également profitable durant le processus d'estimation des hauteurs des structures.

Ce rapport se présente sous forme de deux grandes parties. Dans la première partie, nous avons regroupé les analyses radiométrique et géométrique des données qui ont permis d'aboutir à une méthodologie de construction des MNE. Dans la seconde partie, nous présentons les algorithmes mis

en œuvre dans cette chaîne radargrammétrique et les résultats sur l'extraction des structures et sur le 3-D.

La première partie est composée de deux chapitres :

- Le chapitre 1 contient l'ensemble des notions importantes pour la compréhension des images RSO haute résolution et leur utilisation dans les applications cartographiques. Nous étudions de plus la position dans l'image radar des échos résultant de phénomènes de réflexions et de rebonds multiples pour une structure verticale située sur un sol plat. Les images RAMSES sont présentées et les images radar de quelques structures, cuves et bâtiments, sont interprétées grâce à l'étude des positions relatives des échos. Le chapitre se poursuit par l'analyse statistique des amplitudes. Nous proposons une méthode originale d'analyse consistant à utiliser un algorithme de classification pour trouver les lois décrivant chaque classe de l'image.
- Le chapitre 2 concerne l'analyse des données stéréoscopiques. Des rappels bibliographiques sont proposés sur la géométrie radar en stéréoscopie et l'extraction du 3-D en stéréovision, en radargrammétrie et en haute résolution par mesure monoscopique et interférométrie. La potentialité géométrique des couples stéréoscopiques est ensuite mesurée théoriquement après avoir calculé un modèle d'erreurs valable pour toutes les configurations. Nous vérifions enfin la pertinence de l'information 3-D contenue sur les échos forts des structures.

Cette analyse conduit à la proposition d'une chaîne algorithmique pour la construction d'un MNE. La seconde partie concerne les traitements mis au point dans cette chaîne et comporte deux chapitres :

- Le chapitre 3 traite de l'extraction des structures sur une seule image d'amplitude. Le principe repose sur l'extraction des structures brillantes en forme de demi-couronnes pour les cuves et de 'L' pour les bâtiments. Le traitement pour les cuves est mené avant celui sur les bâtiments. Ainsi, des algorithmes utilisant la transformée de Hough circulaire sont mis en œuvre. Par le biais de simulations d'images de demi-couronnes brillantes et tests sur les images réelles, certaines limitations, peu abordées dans la littérature, sont mises en évidence. Face à ces limitations, une méthode différente est développée pour la reconnaissance de la forme englobant le mieux possible la structure brillante par optimisation d'un critère surfacique. Cet algorithme est ensuite étendu à l'extraction des bâtiments.
- Dans le chapitre 4, chaque étape de la chaîne radargrammétrique est détaillée. Tout d'abord, différentes fonctions de corrélation pour la mise en correspondance de points sont comparées. L'extraction des structures en monoscopie est ensuite étendue à la stéréoscopie. Le MNE est alors obtenu par le calcul des altitudes du sol entre les structures détectées et l'estimation des hauteurs des structures. Une méthodologie pour la mesure de la hauteur du bâti est proposée. Elle utilise conjointement des informations stéréoscopiques et la mesure monoscopique des hauteurs. Ce chapitre est étayé par les résultats sur une scène de cuves et une scène de bâtiments. Pour se faire, une vérité terrain est utilisée.

Nous terminons par des conclusions sur les méthodes proposées et les perspectives sur le sujet.

Remarque

Pour des raisons de confidentialité, toutes les applications numériques liées à la précision des résultats 3-D sont indiquées en pixel : taille du pixel dans l'image radar, TD (unité pr) ou taille du pixel au sol, TDS (unité ps).

PARTIE 1 : ANALYSE

Chapitre 1 : Présentation des images radar

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons à l'image radar : imagerie RSO, modélisation géométrique et relations entre image et terrain, distorsions géométriques dues au relief, effets spéculaires et modèles statistiques dans les cas homogènes, texturés et spéculaires. Ces rappels donnent les éléments importants permettant la compréhension des images et leur utilisation dans des applications cartographiques.

Nous présentons ensuite les images RAMSES utilisées dans cette thèse. En s'appuyant sur les mécanismes de rétrodiffusion connus, l'interprétation de l'image radar de structures industrielles est proposée. Enfin, nous réalisons l'analyse statistique des images d'amplitude par le biais d'un algorithme de classification non supervisée, fournissant en même temps un premier traitement.

I. Imagerie RSO

La technique d'imagerie RSO ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*) fait suite aux radar SLAR (*Side-Looking Aperture Radar* ou radar à ouverture réelle) et utilise un traitement améliorant les résolutions. L'engouement pour le système radar réside dans le fait qu'il fonctionne de jour comme de nuit et que l'onde radar traverse les couches nuageuses et les fumées. Les premiers SAR embarqués datent des années 70 (ANNEXE A).

I.1. Synthèse des images radar

L'interprétation des images radar est étroitement liée à la compréhension de leur formation. Ainsi, nous présentons comment les images sont synthétisées (principaux documents d'appuis : [AFS93], [CARRARA95], [NOCERA96], [POLIDORI97], [OLIVER98], [PETIT00], [RADAR01]).

I.1.1. Généralités sur l'acquisition

I.1.1.1. Système imageur

L'image radar résulte de l'émission d'impulsions micro-ondes par une antenne placée sur un satellite ou un avion. Après rétrodiffusion de l'onde sur le sol, l'antenne recueille les échos de l'impulsion, constituant une ligne des données brutes. La seconde dimension des données brutes est obtenue par répétition des impulsions le long de la trajectoire du porteur à la cadence PRF (fréquence de répétition des impulsions). L'image est formée par traitement de ces données brutes. Les points du sol éclairés par l'onde sont repérés dans l'image par leur distance à l'antenne. Ainsi, les colonnes de l'image synthétisée définissent l'axe des distances antenne-cible et les lignes, l'axe azimutal des positions successives de l'antenne (figure 1-1).

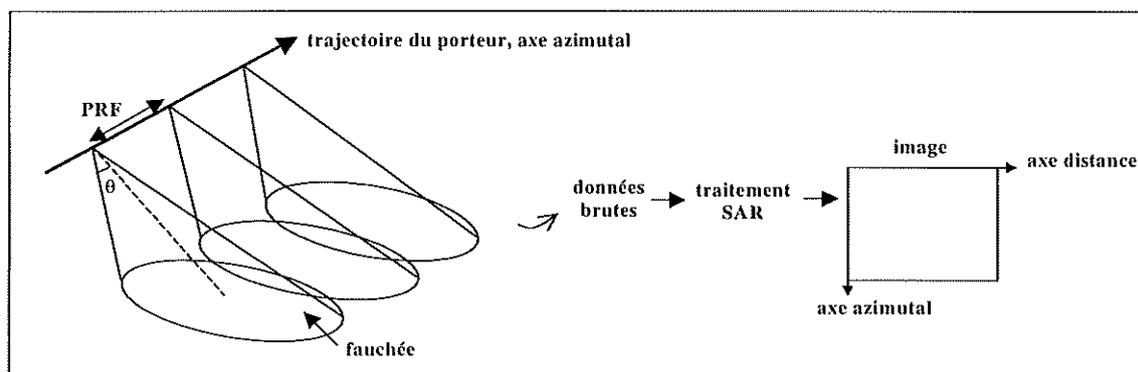


figure 1-1 : schéma d'acquisition des images radar en mode *stripmap*

Ce type d'acquisition correspond au mode *stripmap*. Il existe d'autres types d'acquisition :

- le mode *spotlight* où le lobe d'antenne est piloté au cours du déplacement du porteur pour observer toujours la même cible,

- le mode *scan* : le déplacement du porteur est celui du mode *stripmap* et le lobe d'antenne est piloté dans la direction de la visée,
- le mode inverse ISAR dédié en particulier à la reconnaissance de cibles en vol avec l'antenne radar fixe.

I.1.1.2. Antenne

L'antenne est généralement de forme plane rectangulaire directive de largeur l et de longueur D . Elle rayonne une onde dans son plan orthogonal avec une direction privilégiée. La fauchée est l'empreinte du lobe principal du diagramme d'antenne sur le sol (figure 1-1). La taille de la fauchée dépend de l en distance et de D en azimuth. L'ouverture de l'antenne en azimuth est donnée par la largeur du lobe à -3dB : $\beta = 0.886 \lambda/D$ avec λ la longueur d'onde. Une antenne est d'autant plus directive (ouverture étroite) qu'elle est grande et que λ est petite.

L'antenne peut émettre une onde polarisée. Une onde polarisée horizontalement, notée H (resp. verticalement, V) a un champ électrique parallèle (resp. orthogonal) à la trajectoire. Indépendamment de l'onde émise, l'onde rétrodiffusée est dépolarisée en deux composantes, H et V. Suivant les polarisations émises et reçues, on définit quatre types de radar : HH, HV, VH et VV et les radar polarimétriques qui fournissent ces quatre composantes. Les images HH et VV sont dites copolaires et les autres contrapolaires.

I.1.1.3. Onde

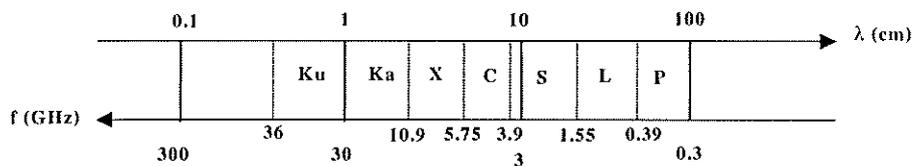


figure 1-2 : les ondes radar

L'onde radar s'étale sur les longueurs d'onde centimétriques des micro-ondes (figure 1-2) et se propage à la vitesse de la lumière. Les phénomènes d'interaction de l'onde avec l'environnement dépendent de la longueur d'onde :

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

I.1.1.4. Equation radar, SER et coefficient de rétrodiffusion

L'équation radar fait le bilan entre la puissance émise et la puissance reçue par l'antenne depuis une surface. Dans le cas monostatique, la réception est réalisée au même endroit que l'émission et l'équation s'écrit :

$$P_r = P_e \frac{G_e(\theta_i)}{4\pi r^2} \sigma \frac{G_r(\theta_i)}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Avec :

- P_e et P_r , les puissances émise et reçue par l'antenne
- G_e et G_r , les gains d'émission et de réception, fonction de l'angle d'incidence¹ θ_i
- r la distance antenne-cible
- σ la surface efficace de la cible ou SER (Surface Equivalente Radar)

L'équation radar reflète les pertes d'énergie lors :

- de la propagation de l'onde dans l'atmosphère (termes en $1/r^2$),
- de l'émission (G_e) et de la réception (G_r),
- de la transmission par la surface éclairée (SER σ).

La SER exprime le rapport entre flux incident et flux réfléchi par la surface éclairée. Elle dépend de l'angle d'incidence, de la rugosité de la surface éclairée et de sa permittivité diélectrique qui dépend de la teneur en eau. On définit le coefficient de rétrodiffusion σ_0 comme la SER par unité de surface. L'intensité lue dans l'image est proportionnelle à σ_0 . Sans MNT, l'angle d'incidence est inconnu et le coefficient de rétrodiffusion est estimé en supposant la surface plane située à une altitude moyenne donnée. Les erreurs induites sur la radiométrie des pixels par ces deux hypothèses peuvent être mesurées et corrigées connaissant le MNT.

I.1.1.5. Résolutions SLAR

La résolution est la distance minimale requise entre deux points du sol pour être discriminés dans l'image en distance ou en azimut. Les résolutions SLAR sont celles avant traitement SAR, présenté dans la section I.1.2.

- Résolution en distance ou résolution radiale

Deux cibles éclairées à des instants proches renvoient chacune un écho de même durée τ que celle de l'impulsion émise. Ils peuvent être séparés si le second écho est reçu alors que la réception du premier est finie. Notons r la distance entre l'antenne et la première cible et $r+\delta$ avec la seconde cible. L'onde effectuant un trajet aller-retour, la différence entre les instants de début de réception des deux échos vaut $2\delta/c$. Cette durée doit être supérieure à τ , d'où la résolution en distance (au demi-lobe de la réponse impulsionnelle) :

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} \quad \text{éq. 1-1}$$

La résolution radiale dépend donc de la durée de l'impulsion émise ou reçue.

- Résolution en azimut

Comme en distance, deux diffuseurs sont discriminés si les échos qu'ils renvoient ne se recouvrent pas, autrement dit si les durées de visibilité des points par l'antenne ne se recouvrent pas (figure I-3). Leur éloignement doit être supérieur à la fauchée dans la direction azimutale égale à βr . Un autre raisonnement est possible : soient T_a la durée de visibilité d'un point et V la vitesse azimutale de

¹ L'angle de visée est défini entre la direction de visée au centre de la fauchée et la normale au sol passant par l'antenne. Cet angle est différent de l'angle d'incidence, défini entre la direction de visée et la verticale locale. En aérien, ces deux angles sont similaires mais pas en satellitaire. On confond cependant souvent les deux termes. L'angle de visée est également appelé angle d'élévation et son complémentaire à 90° , l'angle de dépression.

l'antenne. Les zones de visibilité de deux points ne se recouvrent pas si leur éloignement est supérieur à $T_a V$. Nous avons donc :

$$\delta_a = \beta.r \sim \frac{\lambda.r}{D} \quad \text{ou} \quad \delta_a = T_a V \tag{eq. 1-2}$$

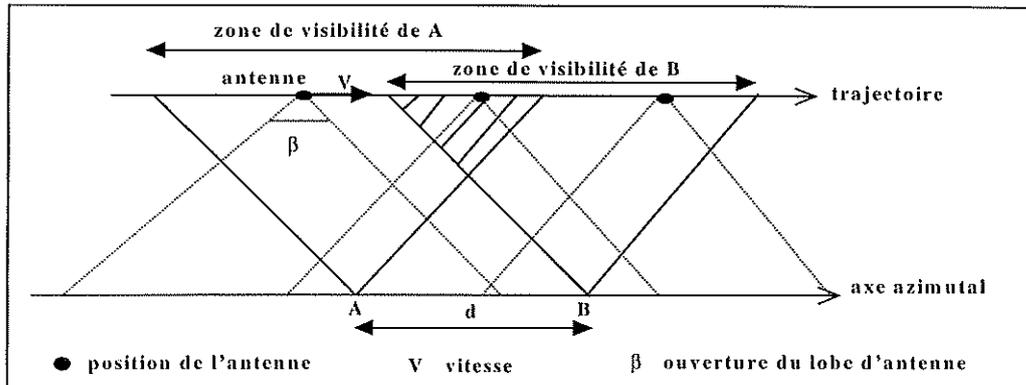


figure 1-3 : recouvrement des zones de visibilité de deux cibles

I.1.2. Traitement SAR

Pour améliorer la résolution en distance (eq.1-1), il faudrait une impulsion de durée très courte et donc de très forte puissance pour engendrer des échos détectables. Pour améliorer la résolution en azimuth (eq.1-2), il faudrait une antenne de taille azimuthale très grande qui ne pourrait pas être embarquée. Par des techniques de traitement du signal, il est possible d'affiner ces deux résolutions sans modifier les paramètres initiaux : taille de l'antenne, durée de l'impulsion, vitesse du porteur. Ainsi, le traitement SAR est fondé sur l'émission d'un signal modulé en fréquence et sur l'exploitation des décalages Doppler. Nous décrivons le principe général de ce traitement avec des équations simplifiées qui permettent d'en comprendre le mécanisme.

I.1.2.1. Compression en distance

Le signal émis est modulé en fréquence afin que deux points illuminés à des instants rapprochés ne le soient pas à la même fréquence. L'onde émise est un *chirp*, de durée τ :

$$e(t) = A e^{2i\pi(f_0 t + \alpha t^2)}, \quad |t| \leq \tau/2, \quad f_0 \text{ la fréquence porteuse et } \alpha \text{ le facteur de modulation}$$

Si les points illuminés ne sont pas dispersifs, les signaux reçus sont de même forme que le signal émis, mais retardés d'une durée T égale à la durée du trajet aller-retour antenne-cible et atténués d'un facteur p dépendant des pertes de transmission :

$$s(t) = p A e^{2i\pi(f_0 t + \alpha(t-T)^2)} e^{-2i\pi f_0 T}, \quad |t-T| \leq \tau/2 \tag{eq. 1-3}$$

Un filtrage adapté est effectué par convolution de l'écho avec une réplique du signal émis. Le résultat de la convolution est un sinus cardinal :

$$s(t) * e^*(-t) = p A^2 \tau e^{2i\pi(f_0 x + \alpha x^2)} \text{sinc}(2\pi\alpha x) \quad \text{avec } x = t - T$$

Après suppression de la porteuse, cette forme nous assure que l'essentiel du signal utile est concentré dans le lobe principal du sinus cardinal. La compression consiste à observer le signal pendant une durée réduite correspondant par exemple à la largeur du lobe à -3dB . La durée de l'impulsion comprimée est alors inversement proportionnelle à : $\Delta f = 2\alpha\tau$. On définit le facteur de compression par le rapport entre la largeur initiale $1/\tau$ et la largeur comprimée :

$$FC_r = (\tau\Delta f)^{-1}$$

La compression d'impulsion améliore la résolution en distance de ce même facteur :

$$\delta_r = FC_r \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2\Delta f} \quad \text{éq. 1-4}$$

La résolution ne dépend plus de la durée τ de l'impulsion, mais de la largeur de bande du signal émis après modulation. La résolution est d'autant plus fine que cette largeur augmente.

I.1.2.2. Compression en azimut

Les points éclairés sont visibles par l'antenne pendant une certaine durée et donc sur une certaine distance parcourue par l'antenne (figure 1-3). Il en résulte un phénomène d'ambiguïté entre :

- les échos des diffuseurs participant à la ligne de l'image,
- les échos des points situés en arrière ou en avant de l'antenne.

Pour discerner les différents cas, l'information Doppler est exploitée. Dans ce contexte, la fréquence Doppler est définie par la différence entre la fréquence des échos reçus pour une distance r et la fréquence centrale correspondant à la distance minimale antenne-cible. Ainsi, la fréquence Doppler est nulle si la cible est dans le plan de visée, positive si elle est en avant de l'antenne et négative sinon (figure 1-4). Nous présentons le traitement en azimut dans le cadre de la focalisation à Doppler nul qui consiste à regrouper les échos d'une même cellule de résolution sur le pixel correspondant à la fréquence Doppler nulle mais ce n'est pas la seule possibilité.

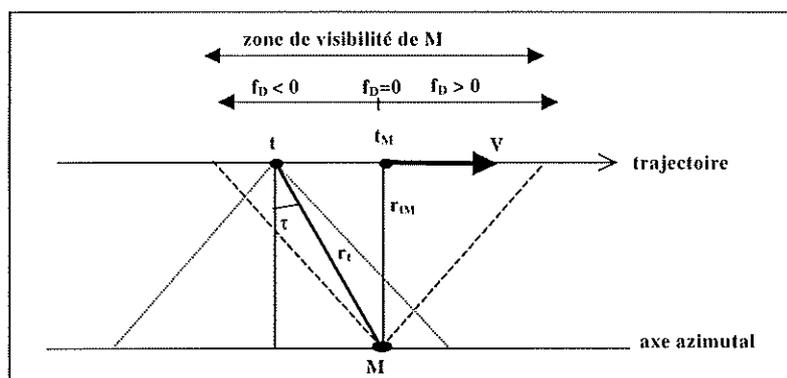


figure 1-4 : variation de la fréquence Doppler pendant le déplacement de l'antenne

Le retard Doppler est contenu dans le second terme de phase de l'écho rétrodiffusé (éq.1-3) qui se retrouve aussi après traitement distance dans le terme, $e^{2i\pi f_D t}$:

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 T = \frac{4\pi}{\lambda} r(t)$$

Soit t_M l'instant où la cible se trouve au centre de la fauchée (figure 1-4). A un instant t proche de t_M :

$$\Phi(t) = \Phi(t_M) + 2\pi(t-t_M) \cdot \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt}(t_M) + 2\pi \frac{(t-t_M)^2}{2} \cdot \frac{2}{\lambda} \frac{d^2r}{dt^2}(t_M)$$

La fréquence Doppler et le taux de variation de la fréquence Doppler sont respectivement définis par :

$$f_D(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt}(t) \text{ et } f_D'(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{d^2r}{dt^2}(t)$$

Le signal *chirp* est traité par compression d'impulsion : filtrage adapté et compression. Comme en distance, le signal après convolution est un sinus cardinal. Ayant intégré sur l'intervalle de visibilité de la cible $[-T_a/2, T_a/2]$, le signal est proportionnel à :

$$\text{sinc}(\pi f_D'(t_M) T_a y) \text{ avec } y = t - t_M$$

La largeur du pic à -3dB vaut approximativement : $(f_D'(t_M) T_a)^{-1}$ et correspond à la durée de visibilité tronquée. Par des relations géométriques simples (figure 1-4), on exprime l'angle Doppler (cas angle faible) par :

$$\tau \approx \sin \tau = \frac{V \cdot (t - t_M)}{r(t)} \text{ et } \sin \tau = \frac{r(t) - r(t_M)}{V \cdot (t - t_M)} = \frac{1}{V} \frac{dr}{dt}(t)$$

De ces deux équations, on déduit :

$$V \sin \tau = \lambda f_D(t) / 2 \tag{éq. 1-5}$$

$$\text{et } f_D'(t_M) = 2V^2 / \lambda r(t_M)$$

Le facteur de compression de la bande vaut :

$$FC_a = (f_D'(t_M) T_a^2)^{-1} \text{ soit } FC_a = D^2 / 2\lambda r(t_M)$$

La résolution azimutale devient (sous hypothèse d'un sol plat) :

$$\delta_a = FC_a \cdot \frac{\lambda r(t_M)}{D} = \frac{D}{2} \tag{éq. 1-6}$$

La résolution ne dépend plus de la distance antenne-cible et le lien à la taille de l'antenne est inversé. Le traitement azimutal ou synthèse d'ouverture permet donc de simuler une large antenne à partir des positions successives d'une petite antenne.

I.1.2.3. Etapes de traitement

- 1) La **réception** des échos passe par un amplificateur, une décomposition en quadrature qui renvoie les parties réelles et imaginaires des échos, puis un filtre passe-bas pour supprimer la porteuse. Cette opération est suivie par la conversion analogique-numérique où les deux signaux sont échantillonnés. D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage F_e (en distance) doit être supérieure à la bande passante B du signal détecté pour qu'il n'y ait pas de pertes. En général, $F_e = 1,2B$. En azimut, la réception des échos est régulée par la PRF qui doit être supérieure à la bande Doppler.
- 2) Le **traitement SAR** est ensuite effectué à partir des données numériques stockées ou transmises au sol. Les opérations de convolution sont coûteuses en temps de calcul. Le traitement est donc plutôt effectué dans le domaine de Fourier où les convolutions deviennent des multiplications. Il s'appuie sur des FFT 1D ou 2D selon que le filtrage adapté en distance et en azimut est séquentiel ou bidimensionnel. Lors du calcul d'une image, plusieurs traitements interviennent :
 - la correction radiométrique,
 - la correction des migrations en distance,
 - le filtrage multi-vue,
 - l'apodisation.

La correction radiométrique réduit les effets induits par la variation de la puissance de l'onde incidente entre le début (distance proximale ou *Near Range*) et la fin de la fauchée (portée distale ou *Far Range*). Le système doit se donner une SER minimale et maximale pour étaler les SER détectées. Cette opération devient plus difficile sur certaines scènes où les SER varient fortement, comme sur les scènes urbaines. Pour avoir une calibration absolue, vérifier la qualité radiométrique d'une image ou comparer des images de différentes sources, on utilise des images sur des sites test : désert, océan ou scènes avec des coins réflecteurs placés sur le terrain (cf. I.3.2).

La correction des migrations en distance agit sur l'étalement des échos d'une même cellule de résolution sur plusieurs cases distances. En effet, la distance antenne-cible varie entre autre à cause du déplacement du porteur, de la rotation de la Terre et de l'excentricité de l'orbite dans le cas satellitaire.

Le traitement multi-vue consiste à découper la bande Doppler en sous-bandes. Une image est créée par sous-bande. L'image moyenne des sous-images permet de réduire le bruit mais au prix d'une perte de résolution (cf. I.4.1.3).

En présence de réflecteurs forts, les lobes secondaires du signal convolué sont importants et induisent une ambiguïté sur l'estimation de la position en distance et en azimut. Etant donnée la forme en sinus cardinal du filtrage adapté, l'écho se répète régulièrement dans l'image en distance et en azimut avec une intensité décroissante. L'image du réflecteur fort est donc une croix. L'apodisation consiste à pondérer le spectre du signal de référence par une fenêtre en cosinus. Une telle fenêtre a pour effet d'élargir le lobe principal mais de diminuer les lobes secondaires par rapport à la fenêtre carrée correspondant à l'observation réduite dans le temps du signal rétrodiffusé. L'écho fort apparaît alors sous forme d'un spot brillant qui s'étale sur quelques pixels. La fenêtre de Hamming est souvent utilisée :

$$H(f) = k + (1 - k) \cos\left(\frac{2\pi}{B} f\right) \text{ avec } k=0.54$$

- 3) La **détection** est la dernière étape de formation de l'image et renvoie l'intensité ou l'amplitude du signal complexe : $I = A_I^2 + A_R^2$ et $A = \sqrt{I}$. Les images sont souvent produites avec un pas d'échantillonnage de $2B$. Ceci est équivalent à prendre un pas entre les pixels égal à la moitié de la résolution.

I.1.3. Limitations

Outre les migrations en distance, des ambiguïtés ont lieu en distance et en azimut. En azimut, les lobes secondaires du diagramme d'antenne ne sont pas toujours négligeables en présence d'une cible très réfléchissante. En distance, la mesure de retard de l'écho est erronée si la variation de la distance de l'antenne à la scène n'est pas connue assez précisément.

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

En aéroporté, l'avion est soumis aux perturbations extérieures comme le vent. La trajectoire n'est pas parfaitement rectiligne uniforme (nominale). La compensation du mouvement a schématiquement pour but de redresser les données qui seraient distordues si l'image était calculée par rapport à la trajectoire nominale. L'écart à la trajectoire nominale peut être mesuré connaissant les vitesses et positions du capteur (mesurées par GPS et/ou centrale inertielle) ou par autofocus.

Pour améliorer la qualité géométrique des données, il est nécessaire de corriger les paramètres d'acquisition avec des points de contrôle. L'ONERA/DTIM a développé plusieurs méthodes de correction des paramètres. Nous utilisons la correction qui consiste à calculer un décalage entre les positions initiale et finale du capteur. Les décalages sont calculés par moindres carrés d'après les amers qui sont sélectionnés manuellement sur la BDTopo® (IGN, modèle 3-D). Les amers sont choisis aux intersections de routes mais la précision du pointé est généralement altérée à cause du bruit et du manque de contraste.

I.1.4. Paramètres dimensionnants

Le tableau I-1 résume les paramètres essentiels avec un exemple en satellitaire (ERS-1) et un exemple en aéroporté extrait de [CARRARA95].

	cas satellitaire, ERS-1	cas aéroporté
paramètres généraux		
longueur d'onde λ ou bande	5.7cm, bande C	3.1cm, bande X
taille de l'antenne Dx/l	10 m x 1 m	≈ 1.6 m x non précisé
portée proximale NR ou altitude du porteur H	$H = 785$ km	$H = 5000$ m
angle d'incidence (au centre de la fauchée)	23°	60°
vitesse du porteur V	6628 km/s	100 m/s
polarisation	VV	V ou H
paramètres distance		
bande passante du signal B ou durée d'impulsion τ	37.12 μ s	38.5 μ s
largeur de bande Δf ou facteur de compression FC_r	15.55 MHz, 575^{-1}	185 MHz, 7122^{-1}
fréquence d'échantillonnage en distance F_e	18.96 MHz (= 1.2×15.55)	222 MHz
résolution en distance δ_r (éq.1-4)	9.64 m	0.8 m
pas en distance du produit image	12.5 m (= $\frac{1}{2}$ résolution sol)	0.4 m
paramètres azimuth		
bande Doppler Δf_d ou facteur de compression FC_a	1260 Hz, 957^{-1}	130 Hz, 245^{-1}
PRF	1680 Hz	1000 Hz
résolution en azimuth δ_a (éq.1-6)	< 5 m	0.8 m
pas en azimuth du produit image	12.5 m	1 m

tableau 1-1 : exemples de paramètres d'un système radar satellitaire et d'un second aéroporté

I.2. Modélisation géométrique de l'acquisition

Les CPDV (Conditions de Prise De Vue) comprennent les positions et vitesses instantanées du porteur, éventuellement les fréquences Doppler instantanées, ainsi que les paramètres cités dans le tableau 1-1. Partant d'images d'amplitude et des CPDV, la construction d'un MNE utilise les relations de passage entre image et terrain. Nous donnons donc les éléments utiles à la représentation géométrique des données et les méthodes de projection d'un point de l'image sur le terrain et inversement :

- transformation des coordonnées image en coordonnées temps/distance connaissant les CPDV,
- passage des coordonnées temps/distance aux coordonnées 3-D sur le terrain connaissant les CPDV et l'altitude du point.

Les distorsions géométriques dans l'image dues aux effets du relief sont aussi rappelées.

I.2.1. Localisation de points

I.2.1.1. Référentiels et repères

L'utilisation des images radar en cartographie fait appel à quatre repères :

- le repère géographique des CPDV. Les positions et vitesses sont fournies par un GPS et/ou une centrale inertielle. Ce repère est donc en général un référentiel géodésique de référence

(O, U_1, U_2, U_3) , où O est proche du centre de la Terre, U_3 est dirigé dans l'axe de rotation de la Terre et U_1 vers le méridien de Greenwich. Les coordonnées sont exprimées en coordonnées géographiques : latitude, longitude et altitude. Les altitudes sont mesurées à la surface de l'ellipsoïde modélisant la Terre ou du géoïde de référence, construit suivant les surfaces de potentiel de pesanteur constant (système de Canberra GRS80). Le système géodésique spatial en vigueur est WGS84 dont l'exactitude est proche du mètre [IGN].

- Le repère local cartographique des cartes, bases de données topographiques (BDTopo®) ainsi que des MNE et MNT produits. Il s'agit d'un repère cartographique (C, X_c, Y_c, Z_c) , avec C un point sur la surface de référence (en général un ellipsoïde local le plus proche possible du géoïde de référence), X_c suit un méridien de référence (Paris ou Greenwich) et Z_c la normale locale. En France, le système géodésique local est la NTF qui divise la France en 4 zones (méridien de référence Paris, altitude par rapport à l'ellipsoïde de Clarke 1880), et depuis 2001 le RGF93. Le système cartographique associé, le Lambert, est la projection plane d'un de ces deux systèmes.
- Le repère image en pixel (ligne,colonne).
- Le repère instantané direct (N_t, X_t, Y_t, Z_t) , utile pour la mise en équation de calculs intermédiaires. Il est centré sur le nadir (projeté de la position S_t de l'antenne au sol) à un instant donné. X_t suit le vecteur vitesse, Y_t est dirigé vers la visée et Z_t suit la normale locale passant par S_t , dans le sens des altitudes négatives pour une visée à droite (figure 1-5).

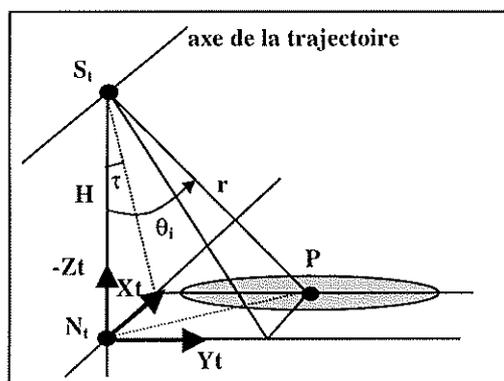


figure 1-5 : définition du repère instantané radar

Les transformations d'un repère géographique à un autre passent par l'utilisation d'un système où les coordonnées sont cartésiennes, exprimées en mètre.

1.2.1.2. Définition du cercle distance-Doppler

A partir de la figure 1-5, on montre que les coordonnées d'un point P vu par l'antenne vérifient :

$$\begin{cases} r = S_t P \\ \vec{V}_t \cdot S_t P = V_t r \sin \tau \end{cases} \quad \text{éq. 1-7}$$

La première équation, appelée équation distance, définit la sphère distance de rayon r et de centre S_t . La seconde équation, l'équation Doppler, correspond au cône Doppler de centre S_t et de demi-angle au sommet $r \sin \tau$. Le cône devient un plan si l'angle Doppler est nul. Le point P appartient à l'intersection

de la sphère distance avec le cône Doppler, appelée cercle distance-Doppler (figure 1-6). Outre les CDPV, la localisation du point sur le cercle n'est possible que si son altitude est connue (MNT donné).

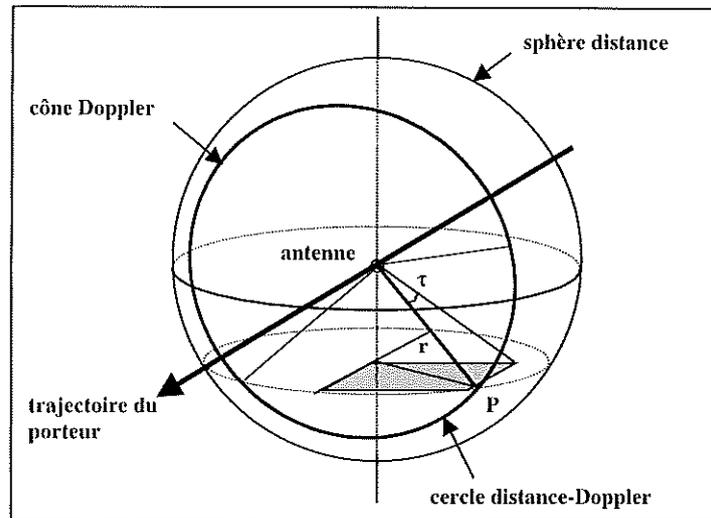


figure 1-6 : localisation d'un point P sur son cercle distance-Doppler

I.2.1.3. Orientation interne

Dans le cadre de l'exploitation d'images radar en cartographie, les positions et vitesses du porteur sont fournies pour chaque instant correspondant à l'acquisition d'une ligne de l'image ou sont interpolées. L'orientation interne définit la relation entre les coordonnées image (i, j) d'un point et les données : date d'acquisition du point, t , et distance antenne-cible, r .

L'indice de ligne indique la position de l'antenne à la date d'acquisition, S_t . Connaissant la PRF et un indice de ligne i_0 avec l'instant correspondant t_0 ou la position capteur S_0 , on a :

$$i - i_0 = PRF(t - t_0) = PRF \cdot \Delta t \tag{eq. 1-8}$$

ou, à faible variation de la vitesse, $i - i_0 \approx PRF \cdot S_0 S_t / V_t$

L'indice de colonne dépend de la distance antenne-cible, de la taille du pixel², TD , et de la longueur de la portée proximale, NR (figure 1-7) :

$$r = NR + TD \cdot j \tag{eq. 1-9}$$

I.2.2. Projections

I.2.2.1. Géométrie radar et géométrie terrain

En géométrie radar, les distances antenne-cible sont échantillonnées le long de l'axe de visée ou axe des distances radar. En géométrie terrain, elles sont ré-échantillonnées au sol, sur un plan de

² La taille du pixel est égale au pas entre pixels choisi lors de la formation de l'image pendant la phase de détection.

référence ou sur un MNT (figure 1-7). La taille du pixel en géométrie terrain varie en fonction de l'angle d'incidence :

$$TD_{sol} \approx TD / \sin \theta_i$$

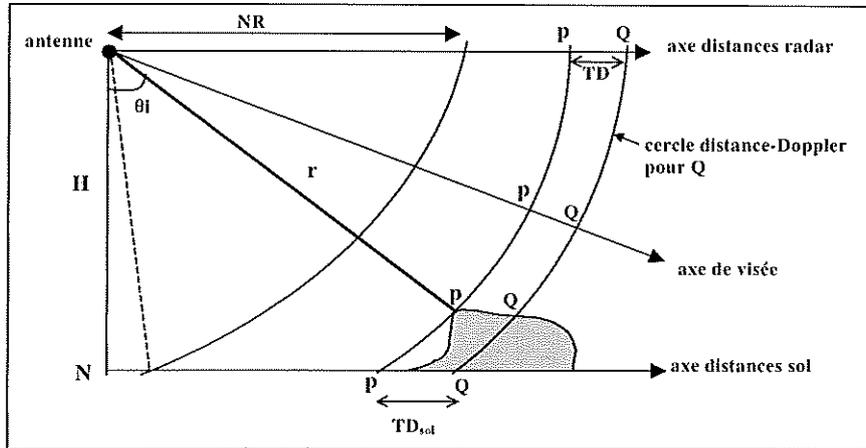


figure 1-7 : géométrie radar et géométrie terrain

I.2.2.2. Passage de l'image au terrain connaissant la hauteur

Le passage au terrain ou géoréférencement est la projection de l'image en géométrie terrain dans un référentiel géographique ou cartographique. Connaissant l'altitude et les CPDV, nous utilisons la méthode de D. Massonnet rappelée dans [TARAYRE96], qui consiste à calculer la position 3-D du point itérativement jusqu'à convergence :

- Initialisation des coordonnées de $P_{(0)}$ à $(lat_0, long_0, h)$,
- Calcul des nouvelles coordonnées de $P_{(1)}$, $(lat_1, long_1, h)$, par :

calcul des vecteurs : $\vec{W} = \vec{OS}_i \wedge \vec{V}$ et $\vec{U} = \vec{OP}_{(0)} \wedge \vec{W}$ qui s'annule pour un angle Doppler nul,

$$\vec{OP}_{(1)} = \frac{a\sqrt{OP_{(0)}^2 W^2 - U^2 \vec{W} + \vec{W} \wedge \vec{U}}}{W^2}, \text{ où } a = 1 \text{ (resp. } -1) \text{ pour la visée à gauche (resp. à droite).}$$

I.2.2.3. Passage du terrain à l'image

L'indice de ligne est déterminé itérativement jusqu'à convergence :

- Initialisation de i à i_1 . Calcul de t_1 par l'équation 1-8, de S_1 et V_1 d'après les CPDV fournis,
- Calcul du nouvel indice de ligne à partir de l'équation du cône Doppler :

$$\vec{S}_i \vec{P} \vec{V}_i = V_i S_i P \sin \tau \text{ soit } \vec{S}_i \vec{S}_1 \vec{V}_i = -\vec{S}_1 \vec{P} \vec{V}_i + V_i S_i P \sin \tau$$

$$\text{en supposant } \vec{V}_i = \vec{V}_1 \text{ et } \vec{S}_i \vec{S}_1 \approx \vec{V}_1 \Delta t, \text{ on a : } \vec{S}_i \vec{S}_1 \vec{V}_i = -\vec{S}_1 \vec{P} \vec{V}_i + V_i S_i P \sin \tau$$

$$\text{et } \Delta t = \frac{\vec{S}_1 \vec{P} \vec{V}_i}{V_1^2} - \frac{S_i P \sin \tau}{V_1}, \text{ puis calcul des nouveaux } i, t, S_i \text{ et } V_i$$

La colonne est déduite simplement à partir l'équation 1-9.

I.2.3. Distorsions dues aux effets du relief

La géométrie particulière en radar donne lieu à trois effets du relief : la compression, le repliement et les ombres.

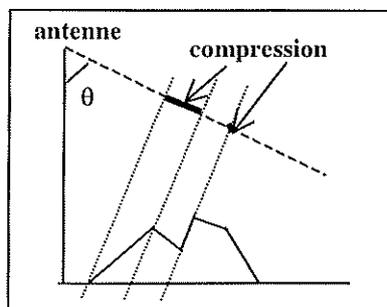


figure 1-8 : compression

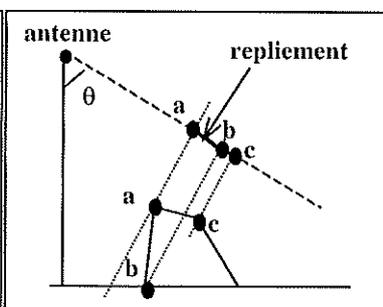


figure 1-9 : repliement

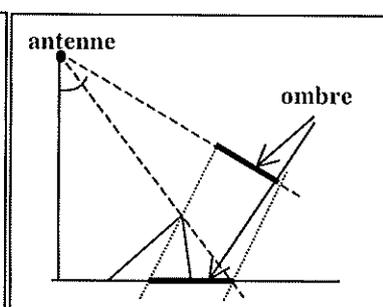


figure 1-10 : ombre

La compression se produit pour des pentes faisant face au radar qui ont un angle de pente inférieur à l'angle de visée. La pente apparaît avec une longueur réduite sur l'image radar jusqu'au cas extrême où elle se réduit à un point en cas d'égalité des deux angles (figure 1-8).

Le repliement a lieu lorsque la pente éclairée a un angle supérieur à l'angle de visée. Dans ce cas, le sommet de la pente est éclairé avant sa base. La partie élevée participe alors aux mêmes pixels que les parties basses situées en avant du relief haut (figure 1-9).

Les ombres coïncident avec les parties cachées (figure 1-10). L'ombre apparaît dans le cas d'une pente opposée au radar. Cette pente engendre une zone qui n'est pas visible par l'antenne ce qui se traduit par des pixels sombres sans information. A hauteur constante, la longueur de l'ombre augmente avec l'angle d'incidence.

I.3. Les effets spéculaires

Les réflexions spéculaires de l'onde sur les surfaces lisses peuvent induire des échos fortement brillants sur les images radar. Ces effets étant nombreux sur le bâti, il est important de bien les comprendre. Nous rappelons donc la définition d'une surface lisse, les effets miroirs, dièdres et trièdres et les conséquences de ces phénomènes sur l'analyse de scènes urbaines. Afin d'intégrer facilement la connaissance de ces particularités lors de l'analyse et du traitement des images haute résolution, nous précisons les positions relatives des échos résultant de ces différents mécanismes pour une structure verticale située sur un sol plat. Cette analyse vise à faciliter l'interprétation des échos forts liés à une structure sur les images radar haute résolution.

I.3.1. Critère de Rayleigh

Dans cette section, nous effectuons quelques rappels issus de [BECKMAN87]. Le champ rétrodiffusé dépend de la longueur d'onde, de l'incidence et des propriétés du matériau. On distingue :

- les surfaces lisses renvoyant une onde dans une direction privilégiée : la réflexion est spéculaire,

- les surfaces rugueuses depuis lesquelles l'onde est renvoyée uniformément dans toutes les directions : la rétrodiffusion est diffuse,
- les surfaces intermédiaires.

Le critère de Rayleigh sert à caractériser les différents types de surfaces. Il s'agit d'un critère simplifié où la densité de diffuseurs sur la surface n'est pas considérée. Soit une surface avec des irrégularités d'altitude h . La différence de chemin entre les rayons 1 et 2 et la différence de phase s'écrivent (figure 1-11) :

$$\Delta r = 2h \cos \theta_i \text{ et } \Delta \varphi = 2\pi \Delta r / \lambda = 4\pi h \cos \theta_i / \lambda$$

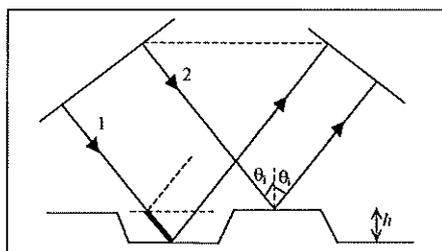


figure 1-11 : différence de parcours (en gras) entre deux rayons incidents, 1 et 2

Si cette différence de phase tend vers 0, les rayons rétrodiffusés sont ajoutés (interférences constructives). Si elle tend vers π , les rayons renvoyés sont en opposition de phase et s'annulent (interférences destructives), la rétrodiffusion devient diffuse. La différence de phase mesure donc la rugosité de la surface. Une surface est d'autant plus lisse que l'angle d'incidence est grand et que la longueur d'onde est grande car les irrégularités deviennent négligeables devant la longueur d'onde. Le critère de Rayleigh stipule qu'une surface est lisse tant que $\Delta \varphi < \pi/2$ (figure 1-12) :

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}$$

Un critère modifié postule qu'une surface est :

- lisse si $h < \frac{\lambda}{25 \cos \theta_i}$ ($\Delta \varphi < 30^\circ$)
- rugueuse si $h > \frac{\lambda}{4.4 \cos \theta_i}$ ($\Delta \varphi > 160^\circ$)

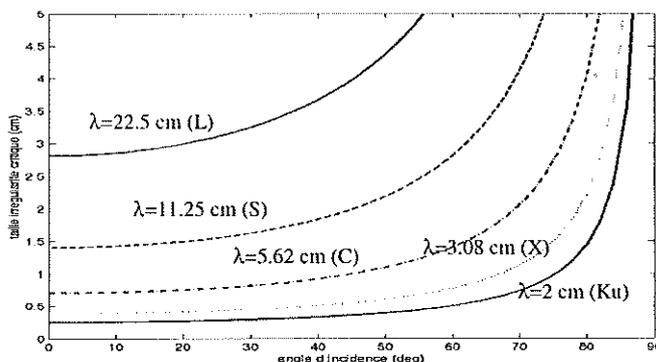


figure 1-12 : critère de Rayleigh en fonction de l'incidence et de la longueur d'onde

I.3.2. Effets miroirs, effets dièdres et trièdres

Les constructions urbaines (métal, ciment, etc) sont généralement lisses relativement à la longueur d'onde. Des réflexions spéculaires sont donc susceptibles de se produire.

Si la réflexion a lieu vers l'antenne, le réflecteur spéculaire est représenté sur l'image par une croix. Après apodisation, il apparaît sous forme d'un spot fortement brillant (cf. section I.1.2.3). Par contre, il n'est pas visible si la réflexion a lieu dans toute autre direction. Ainsi, l'eau calme et les toits plats se comportent comme des miroirs et apparaissent noirs sur l'image.

Des réflexions multiples se produisent entre surfaces voisines. Lorsque ces surfaces sont lisses, l'énergie reste suffisamment importante pour produire un effet visible sur les images. L'effet dièdre correspond aux rebonds doubles qui surviennent entre deux surfaces lisses et l'effet trièdre aux rebonds triples entre trois surfaces lisses (figure 1-13). L'ensemble des trajets multiples contribue au coin formé entre les faces, ce qui donne lieu à un pixel fortement brillant dans l'image. L'énergie totale rétrodiffusée dépend de la taille des panneaux. Les coins réflecteurs utilisés lors de la calibration radiométrique (cf. section I.1.2.3), sont des trièdres formés par trois panneaux métalliques.

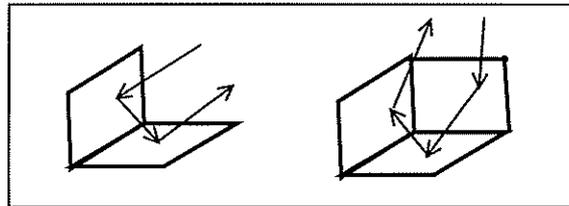


figure 1-13 : effets dièdre et trièdre

Des rebonds triples peuvent aussi avoir lieu dans un dièdre. F. Leberl [LEBERL90] présente ce phénomène entre un pylône métallique et une étendue d'eau. Outre le trajet direct le long du pylône, l'onde suit un trajet multiple : eau - pylône - eau - antenne. Par conséquent, le pylône est vu deux fois dans des sens opposés (figure 1-14).

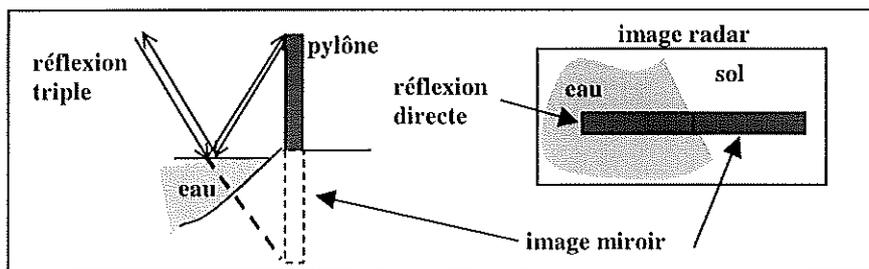


figure 1-14 : interprétation de l'image d'un pylône métallique au bord de l'eau [LEBERL90]

Notons que la diffraction sur les bords peut aussi être à l'origine d'échos forts dans l'image radar (voir par exemple [STOYLE98]).

I.3.3. Conséquences pour la cartographie de bâtiments

Le critère de Rayleigh n'indique pas quand une surface lisse donne lieu à un écho fort sur l'image radar. Par ailleurs, si le sol autour du bâtiment est sans texture et le toit plat se comporte comme un miroir, le bâtiment n'est pas discernable du fond. La signature radar typique d'un bâtiment à toit plat

est alors un 'L' brillant, résultant du dièdre entre le mur et le sol. Cette signature et l'amplitude des échos forts varient selon plusieurs facteurs [FORSTER97], [XIA97] :

- les paramètres radar :
 - la longueur d'onde : les surfaces sont d'autant plus lisses que la longueur d'onde augmente. La bande X est souvent préférée pour l'analyse des scènes urbaines car plus de textures apparaissent,
 - la polarisation : les images copolaires sont dominées par les rétrodiffusions surfaciques telles que les effets spéculaires. En polarisation croisée, ces retours sont plus faibles au bénéfice des réflexions volumiques, qui ont lieu par exemple sur la végétation. La polarisation HV est donc souvent retenue lorsque l'on souhaite diminuer le nombre des échos forts,
 - l'angle d'incidence : une incidence de 40° semble adaptée aux villes, offrant un bon compromis entre renversement et ombre,
 - le réglage du contraste lors de la synthèse d'image : si la dynamique autorisée est trop faible, il y a peu de contraste entre la structure et le fond. Si elle est très forte, le sol apparaît très foncé, comme les zones sans information. Un ajustement local est donc préféré.
- Les caractéristiques du bâtiment :
 - la constante diélectrique, la rugosité, la taille et la forme : ces variables déterminent le caractère lisse de la surface et la puissance de l'écho diédrique s'il a lieu,
 - l'orientation du bâtiment : la SER sur un mur face au radar, induisant un effet diédrique, diminue avec l'angle d'incidence et l'angle d'orientation du bâtiment. D'après [FORSTER97], le minimum survient pour une orientation du bâtiment de 22.5° par rapport à la visée. Ainsi, J. Dowman et al. [DOWMAN82] observent sur des images aériennes que les bâtiments assez grands, les plus récents et orientés perpendiculairement par rapport à la visée, apparaissent le mieux. Les maisons sont reconnues dans une proportion de 37% par un interprète d'images contre plus de 70% pour les immeubles et écoles.
- L'environnement : nature du sol, occultation par d'autres structures.

Les surfaces non-signantes, nommées 'non-vues', c'est-à-dire n'apparaissant pas dans les images, ainsi que la variabilité de la réponse d'un bâtiment, suivant les paramètres radar, les caractéristiques de la structure et l'environnement, sont un frein à l'utilisation des données radar en cartographie urbaine. Les échos forts rendent l'interprétation des images également difficile.

Pour une analyse plus fiable de la scène, M.L. Bryan [BRYAN82] préconise d'utiliser l'image des différences entre deux vues radar recalées, acquises sous des caps différents. En faisant apparaître les 'non-vus' d'une image à l'autre, l'image des différences permet d'alerter l'utilisateur et de fournir des informations sur la visée et les caractéristiques des structures lisses.

Une autre possibilité est d'utiliser, quand elles sont disponibles, des images polarimétriques qui permettent de distinguer les différents mécanismes de rétrodiffusion (voir par exemple [POTTIER00]). D'après [FORSTER97], la classification de ces images suivant les différents phénomènes de rétrodiffusion permet d'observer la prédominance des rebonds simples ou impairs (trièdres) et des

ondes dépolarisées en zone résidentielle. En zone commerciale, les rebonds doubles prédominent. Les rebonds simples apparaissent davantage en VV qu'en HH.

I.3.4. Généralisation à l'étude du bâti

Nous proposons dans cette section de compléter ces informations par l'étude de l'organisation dans l'image radar des différents types de réflexions spéculaires (rebonds simples, doubles et triples) sur une structure verticale située sur un sol plat, dans le cas où ces phénomènes se produisent. Pour cela, les expressions des distances radar correspondantes sont analysées.

I.3.4.1. Organisation des rebonds simples, doubles et triples dans l'image radar

Les éléments indiqués dans le paragraphe I.3.2 nous permettent d'appréhender la position relative des réflexions directes, des rebonds doubles et même des rebonds triples pour le cas d'un élément très réfléchissant (figure 1-15).

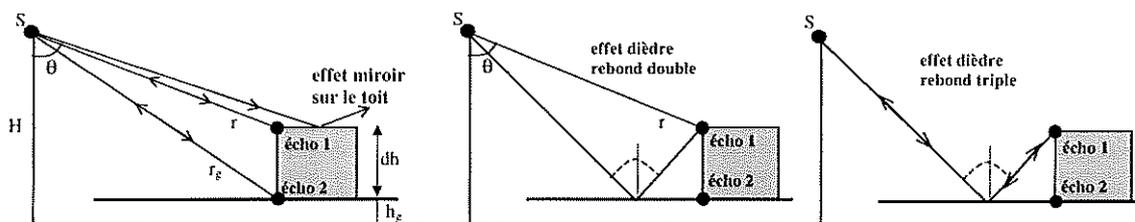


figure 1-15 : parcours de l'onde radar pour les réflexions directes, les rebonds doubles et triples dans un dièdre

Sur une même ligne azimutale et à localisation planimétrique constante, plus la distance augmente, plus l'altitude diminue. Par conséquent, les échos apparaissent sur l'image radar dans l'ordre des distances croissantes ou des altitudes décroissantes :

- la réflexion directe depuis le bord du toit,
- la réflexion directe depuis le coin diédrique sol/structure,
- les rebonds doubles dans le dièdre qui s'accumulent sur le pixel correspondant au coin diédrique,
- le rebond triple qui correspond à une altitude inférieure à celle du sol d'après la figure 1-14.

Les rebonds multiples génèrent donc une ambiguïté très importante sur l'interprétation de l'image d'une structure et sur la recherche de sa hauteur, puisque chacun de ces phénomènes correspond à une altitude différente. Nous nous intéressons ci-dessous à l'expression des distances radar de ces échos dans le cas d'une face perpendiculaire et non perpendiculaire à la visée.

I.3.4.2. Cas d'un mur perpendiculaire à la visée

I.3.4.2.1. Les rebonds doubles

Notons (figure 1-15) :

- h_g l'altitude du sol et r_g la distance correspondante,
- h l'altitude absolue de l'objet et r la distance correspondante,
- dh l'altitude relative : $dh=h-h_g$,
- θ (resp. θ_g) l'angle d'incidence au point d'altitude h (resp. h_g),
- $r_2(dh, r, \theta)$ la distance pour le rebond double au point d'altitude h .

Le rebond double correspond au parcours de l'onde suivant : sol-structure-antenne ou structure-sol-antenne. Nous modélisons ces trajets de façon simplifiée par un angle miroir sur le sol dans le premier cas et sur la structure dans le second. L'angle miroir indique la direction privilégiée suivie par l'onde réfléchiée. Le sol étant souvent rugueux, le second trajet est plus susceptible de se produire que le premier. Ces rebonds doubles ont lieu à n'importe quelle hauteur de la structure. Les distances correspondantes sont alors comprises entre $r_2(dh, r, \theta)$ et $r_g(dh, r, \theta)$. Pour un sol plat, nous avons :

$$r_2(dh, r, \theta) = \frac{r}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \frac{dh \cos \theta}{r} + 4 \frac{dh^2}{r^2}} \right) \text{ pour un angle miroir sur le sol,}$$

$$r_2(dh, r, \theta) = \frac{r}{2} \left(1 + \frac{dh}{r \cos \theta} + \sqrt{1 - 2 \frac{dh}{r \cos \theta} + 4 \frac{dh \cos \theta}{r} + \frac{dh^2}{r^2 \cos^2 \theta}} \right) \text{ pour un angle miroir sur la structure, et}$$

$$r_g(dh, r, \theta) = r \sqrt{1 + 2 \frac{dh \cos \theta}{r} + \frac{dh^2}{r^2}}$$

Les rebonds doubles correspondent au même écho que la réflexion directe depuis le coin structure/sol si la différence des distances, $\Delta r = |r_2(dh, r, \theta) - r_g(dh, r, \theta)|$, est inférieure à un seuil. En faisant l'hypothèse que les angles d'incidence sont les mêmes pour les deux types de chemins ($dh \ll H$), on peut montrer par un développement limité d'ordre 2 que pour $dh \ll r$:

$$\Delta r = dh^2 \sin^2 \theta / 2r$$

Donc :

$$\Delta r < \delta \Rightarrow |dh| < \sqrt{2H\delta / \cos \theta \sin^2 \theta}$$

Ainsi, les deux types de phénomènes contribuent au même écho (même case distance sur l'image radar), tant que la hauteur de l'objet est inférieure à un seuil, fonction de l'incidence. Quelle que soit l'altitude du capteur, on montre que ce seuil est majoré par celui donné pour un angle d'incidence de 54.7° qui s'écrit :

$$dh_{\max} = \sqrt{3\sqrt{3}H\delta}$$

On retient donc la condition plus forte mais indépendante des incidences :

$$\Delta r < \delta \Rightarrow |dh| < dh_{\max}$$

Pour une altitude de l'ordre de celle du capteur RAMSES lors de l'acquisition des images utilisées, cette condition est largement valide. Ainsi, l'effet diédrique a bien lieu et l'écho du coin sol/structure résulte de deux phénomènes distincts, la réflexion directe sur le coin et les rebonds doubles. La cellule de résolution correspondante est décrite par un champ résultant de la somme cohérente des différentes contributions élémentaires.

1.3.4.2.2. Les rebonds triples

Lorsqu'un diffuseur élevé est très réfléchissant, comme dans le cas où il forme un coin diédrique, des rebonds triples peuvent se produire avec le sol. Le trajet est sol – cible – sol – antenne. L'exemple de la figure 1-14 présente la modélisation du parcours avec un angle miroir au sol (figure 1-15.b). On peut également trouver le cas où le sol rétrodiffuse fortement l'onde et dans ce cas, l'angle miroir est artificiellement placé sur la structure. Les distances correspondantes sont comprises entre $r_3(dh, r, \theta)$ et $r'_3(dh, r, \theta)$ et s'écrivent :

$$r_3(dh, r, \theta) = r \sqrt{1 + 4 \frac{dh \cos \theta}{r} + 4 \frac{dh^2}{r^2}}, \text{ si l'angle miroir est au sol}$$

$$r'_3(dh, r, \theta) = r \left(1 + \frac{dh}{r \cos \theta}\right), \text{ si l'angle miroir est sur la structure}$$

Ces distances sont supérieures aux distances relatives aux rebonds doubles à une même hauteur. Dans le premier cas (angle miroir au sol), le point correspondant est le symétrique du diffuseur par rapport au sol (figure 1-16.a), donnant lieu sur l'image à un écho miroir (voir la figure 1-14). En supposant toujours le sol plat, l'altitude de cet écho est inférieure à celle du sol :

$$h_i = -(dh - h_g) \tag{1-10}$$

Dans le second cas (angle miroir sur la structure), le point correspondant sur le terrain est le symétrique du point au sol par rapport à la face de la structure. Cet écho indique donc l'altitude du sol (figure 1-16.b). Ce type de phénomène a pu être observé lors d'une étude ONERA/DTIM.

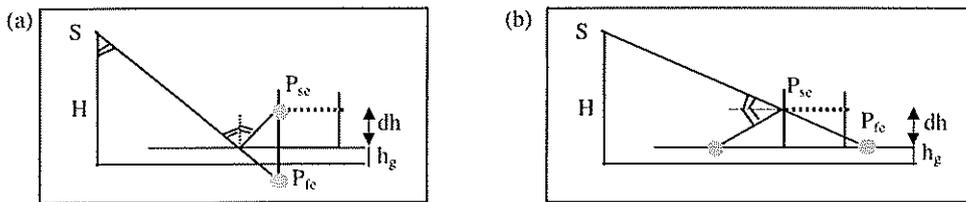


figure 1-16 : interprétation de l'écho triple, avec angle miroir au sol (a) et angle miroir sur la structure (b). P_{se} : diffuseur en haut de la structure. P_{fe} : point correspondant dans l'espace 3-D.

Pour une même hauteur, ces deux types de rebonds triples, s'ils existent, sont distants de (développement limité d'ordre 1 supposant que $dh \ll r$) :

$$\Delta r = dh \cos 2\theta / \cos \theta$$

Ainsi, les deux échos sont confondus uniquement si l'incidence est proche de 45°.

1.3.4.3. Cas d'un mur non perpendiculaire à la visée

L'effet dièdre décrit un phénomène qui a lieu lorsque la face verticale est parallèle à la trajectoire. Dans le cas d'un bâtiment avec une orientation par rapport à la trajectoire, le trajet de l'onde est plus long que celui donné par les formules précédentes (figure 1-17). Pour être visible, il faut que la réflexion soit fortement spéculaire au niveau du mur.

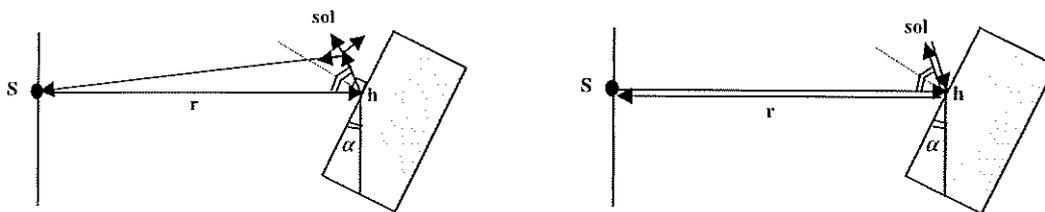


figure 1-17 : parcours de l'onde radar pour le rebond double et le rebond triple sur un bâtiment oblique

L'expression de la distance pour un rebond double, $r_2(dh, r, \theta)$, devient :

$$r_2'(dh, r, \theta) = \frac{r}{2} \left(1 + \frac{dh}{r \cos \theta} + \sqrt{1 - 2 \frac{dh}{r \cos \theta} (2 \cos^2 \alpha - 1) + 4 \frac{dh \cos \theta}{r} \cos^2 \alpha + \frac{dh^2}{r^2 \cos^2 \theta}} \right)$$

Nous avons après développement limité à l'ordre 1 ($dh \ll H$ et $dh \ll r$) :

$$\Delta r' = |r_2'(dh, r, \theta, \alpha) - r_s(dh, r, \theta)| \approx \sin^2 \alpha dh \tan \theta \sin \theta$$

L'écart augmente avec l'angle d'orientation. Ceci doit se traduire sur les images par un étalement de l'écho d'autant plus important que cet angle augmente. En très haute résolution et pour des structures élevées, cet écart ne peut pas être négligé. Dans le cas des images RAMSES utilisées, l'effet reste théoriquement assez modéré pour prévoir qu'il devrait être confondu avec l'étalement de l'écho fort dû au traitement SAR. Pour différencier le cas perpendiculaire du cas non perpendiculaire, nous parlerons d'écho double au lieu d'écho diédrique dans la suite de ce rapport.

Toujours dans le cas de la réflexion spéculaire sur le mur, l'expression de la distance pour le rebond triple n'est pas modifiée par rapport au cas perpendiculaire.

1.3.4.4. Récapitulatif

Outre la rétrodiffusion du sol et éventuellement du toit, des effets déterministes peuvent se produire sur les surfaces lisses du bâti. Ces phénomènes se traduisent par des échos forts qui apparaissent dans l'ordre suivant sur l'image radar le long de l'axe des distances (figure 1-18) :

- la réflexion depuis le bord du toit. Cet écho indique la localisation planimétrique de la structure et la hauteur du toit. Après cet écho, les pixels correspondent aux réflexions le long du mur et la rétrodiffusion du sol et du toit,
- l'écho double issu du coin diédrique et de rebonds doubles. Son épaisseur augmente avec l'angle d'orientation formé entre la surface et la direction de la visée. L'écho double est situé dans l'espace 3-D à l'altitude du sol pour une même localisation planimétrique que le premier écho issu du bord du toit. Après l'écho double, les pixels correspondent à la rétrodiffusion du toit,
- des échos résultant de rebonds triples. L'image de la structure est inversée et dans l'espace 3-D, l'écho est soit sous le sol pour une même planimétrie que les deux échos précédents, soit à l'altitude du sol avec une localisation planimétrique différente.

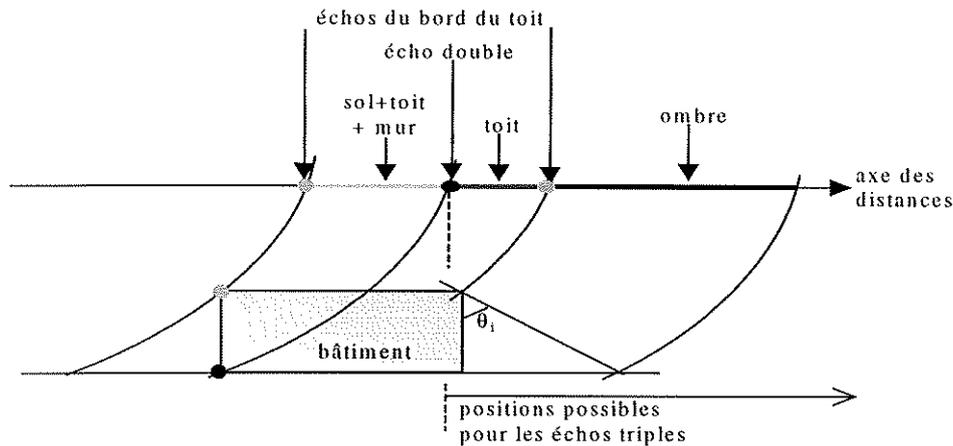


figure 1-18 : récapitulatif de l'image radar d'une structure verticale sur un sol plat : réflexions simples sur le bord du toit, rebonds multiples dans le dièdre sol/structure et rétrodiffusion du sol, du toit et théoriquement du mur

I.4. Modèles statistiques en radar

Les images radar présentent un bruit de speckle d'aspect granulaire. Après en avoir rappelé l'origine et les modèles statistiques théoriques dans les cas homogènes et texturés, nous nous intéressons à la modélisation d'une scène où les hypothèses initiales ne sont plus vérifiées, par exemple comprenant des échocs forts. Nous examinons en II.2 la validité de ces modèles sur les images RAMSES.

I.4.1. Cas du fouillis homogène

I.4.1.1. Hypothèses du speckle totalement développé

La rétrodiffusion sur une surface suffisamment rugueuse est diffuse ce qui induit un caractère aléatoire des phases des champs émis par les N diffuseurs élémentaires composant une cellule de résolution. Le champ reçu par l'antenne est la somme cohérente des champs élémentaires :

$$E = A e^{i\phi} = \sum_{k=1}^N a_k e^{i\phi_k} \quad \text{avec } a_k \text{ (resp. } \phi_k) : \text{ amplitude (resp. phase) du champ émis par le diffuseur } k.$$

Le champ est alors une variable aléatoire dont on peut établir les propriétés statistiques sous les hypothèses du speckle totalement développé [GOODMAN75] :

- les variables a_k et ϕ_k sont indépendantes pour un même k ,
- les variables a_k et ϕ_k sont indépendantes entre elles,
- les variables a_k sont identiquement distribuées,
- les variables ϕ_k suivent une loi uniforme sur $[0, 2\pi]$.

Cette dernière hypothèse n'est pas vérifiée dans le cas d'une réflexion spéculaire car au moins un diffuseur élémentaire renvoie un écho miroir dans une direction privilégiée.

I.4.1.2. Densité de probabilité des images mono-vue

On montre que les parties réelle et imaginaire du champ, A_r et A_i , sont de moyenne nulle et ont une même variance :

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^N E(a_k^2) / 2 \quad \text{éq. 1-11}$$

En supposant N grand, d'après le théorème de la limite centrale, les deux variables, A_r et A_i , sont gaussiennes de moyenne nulle et de variance σ^2 . Elles sont décorréélées donc indépendantes. La loi jointe est donnée par le produit des lois marginales :

$$f_{A_r, A_i}(a_r, a_i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{a_r^2 + a_i^2}{2\sigma^2}\right)$$

La loi jointe $f_{A, \phi}$ de l'amplitude A et de la phase ϕ du champ est déduite par changement de variables : $A_r = A \cos \phi$ et $A_i = A \sin \phi$. D'où :

$$f_{A, \phi}(a, \phi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} a \cdot \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right)$$

Par intégration par rapport à l'une des deux variables, on montre que ϕ suit une loi uniforme sur $[0, 2\pi]$ et que l'amplitude A suit une loi de Rayleigh. Par changement de variable $I = A^2$, on obtient que l'intensité suit une loi exponentielle négative :

$$f_I(i) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{i}{2\sigma^2}\right), \quad E(I) = 2\sigma^2, \quad \text{var}(I) = (2\sigma^2)^2$$

La moyenne et l'écart-type sont proportionnels : $\text{var}(I)/E(I)^2 = 1$. Les fluctuations du bruit augmentent lorsque l'amplitude du signal reçu augmente.

I.4.1.3. Filtrage multi-vue

Afin de diminuer la variance du bruit, on a recours au filtrage multi-vue (cf. I.1.2.3). Le filtrage est effectué par moyennage des L sous-images d'intensité. En effet, il n'existe pas d'expression analytique de la densité de probabilité –ddp– pour la moyenne de L images d'amplitude. On obtient la même distribution des intensités par moyennage de L images après leur synthèse.

Le tableau ci-dessous résume les ddp utilisées et leurs moments. Dans le cas de vues non corrélées, le filtrage multi-vue réduit l'écart-type du bruit sur l'intensité d'un facteur \sqrt{L} : $\text{var}(I)/E(I)^2 = 1/L$.

Type de données	Loi	Moyenne et variance
Intensité mono-vue : I	Loi exponentielle négative : $f_I(i) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{i}{2\sigma^2}\right)$	$E(I) = 2\sigma^2$ $\text{var}(I) = (2\sigma^2)^2$
Amplitude mono-vue : $A = \sqrt{I}$	Loi de Rayleigh : $f_A(a) = \frac{2a}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right)$	$E(A) = \left(\frac{\pi \cdot 2\sigma^2}{4}\right)^{1/2}$ $\text{var}(A) = \frac{4 - \pi}{4} 2\sigma^2$
Intensité multi-vue par moyennage de L vues : $I_L = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L I_k$	Loi gamma : $f_{I_L}(i_L) = \frac{L^L}{(2\sigma^2)^L \Gamma(L)} i_L^{L-1} \exp\left(-\frac{Li_L}{2\sigma^2}\right)$	$E(I_L) = 2\sigma^2$ $\text{var}(I_L) = \frac{(2\sigma^2)^2}{L}$
Amplitude multi-vue par moyennage quadratique : $A_L = \sqrt{I_L} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L A_k^2}$	Loi gamma généralisée (loi χ) : $f_{A_L}(a_L) = \frac{2L^L}{(2\sigma^2)^L \Gamma(L)} a_L^{2L-1} \exp\left(-\frac{La_L^2}{2\sigma^2}\right)$	$E(A_L) = \left(\frac{2\sigma^2}{L}\right)^{1/2} \frac{\Gamma(L+1/2)}{\Gamma(L)}$ $\text{var}(A_L) = 2\sigma^2 \left(1 - \frac{\Gamma(L+1/2)^2}{L\Gamma(L)^2}\right)$

I.4.1.4. Modèle multiplicatif et filtrage du bruit

La relation entre moyenne de l'intensité et variance du bruit explique l'utilisation courante du modèle multiplicatif en imagerie radar :

$$I = R \cdot S \quad \text{éq. 1-12}$$

Le speckle S suit la même loi que l'intensité mais avec une moyenne de 1. La réflectivité R traduit la nature du terrain. Elle est estimée sans biais par la moyenne locale des intensités par la méthode des moments (notée MM, voir ANNEXE B). Elle correspond donc à (éq. 1-12) :

$$R = 2\sigma^2 = \sum_{k=1}^N E(a_k^2) \quad \text{éq. 1-13}$$

Si R est constante sur un ensemble de cellules (c'est-à-dire si ces cellules sont composées de diffuseurs élémentaires de même nature et disposés de façon similaire ou qui produisent un écho global comparable), l'image des intensités est homogène sur les pixels correspondants. Sinon, la réflectivité n'est pas une constante et l'image est texturée. D'après ce modèle, une technique d'analyse consiste à prendre le logarithme de l'image pour se ramener au cas du bruit additif. Suite à cette transformation, l'exponentielle de la moyenne locale des logarithmes des intensités donne cependant une estimation biaisée de la réflectivité. De plus, le modèle multiplicatif n'est pas valable en présence de réflecteurs spéculaires, où les hypothèses du speckle totalement développé ne sont plus valides.

Dans ce contexte, le filtrage du speckle a pour objectif de restituer les réflectivités sous-jacentes. Outre le simple moyennage qui correspond à l'estimation non biaisée de la réflectivité, des filtres s'appuyant sur ce modèle multiplicatif et les ddp théoriques, ont été calculés. Citons les principaux : Frost [FROST82], Lee [LEE81], Kuan [KUAN85] et Gamma MAP [KUAN87]. A. Lopès et al. [LOPES90a] proposent l'amélioration de ces filtres par utilisation du coefficient de variation locale. Lorsque ce coefficient est proche du coefficient théorique, la zone est homogène et la réflectivité est donnée par la moyenne locale. Sinon, tant qu'il est inférieur à un seuil, un filtrage est appliqué. Au-delà de ce seuil, la zone est hétérogène et la modélisation théorique de l'intensité n'est plus valide. La réflectivité ne peut pas être estimée par ces filtres et l'intensité n'est donc pas modifiée. Dans

[RADAR01], un état de l'art sur le filtrage du speckle est proposé. Soulignons qu'il existe d'autres types de filtres appliqués par exemple sur les images après transformation logarithmique, sur les données complexes ou utilisant une fenêtre de calcul adaptative. Les ondelettes sont aussi utilisées pour cette problématique.

I.4.2. Modèles en zone hétérogène

Dans le cas des zones non homogènes, la réflectivité est considérée comme une variable aléatoire. Les premières études ont concerné la surface de la mer puis se sont étendues aux cibles et aux scènes naturelles (champs, végétation).

I.4.2.1. Nombre aléatoire de diffuseurs par cellule de résolution

Constatant que les images de surface de la mer ne suivent pas le modèle de Rayleigh, E. Jakeman et al. [JAKEMAN76] considèrent le nombre de diffuseurs N par cellule de résolution variable et montrent que l'amplitude peut être décrite par une loi K. A la fin des années 70, les mêmes auteurs modélisent plus rigoureusement la variable N comme un paramètre évoluant d'une cellule de résolution à l'autre, suivant un processus de naissance, mort et immigration des diffuseurs élémentaires. Ils concluent que la loi de Poisson et plus généralement la loi binomiale négative pour N conditionnellement à la moyenne μ_N , sont solutions :

$$p(N | \mu_N) = \frac{\mu_N^N}{N!} \exp(-\mu_N) \quad \text{ou} \quad p(N | \mu_N) = C_{N+\alpha-1}^N \frac{(\mu_N/\alpha)^N}{(1 + \mu_N/\alpha)^{N+\alpha}}$$

Dans le cas de la loi binomiale négative, E. Jakeman et al. montrent que l'amplitude A est distribuée asymptotiquement en N selon la loi K :

$$p_A(a) = \frac{2b}{\Gamma(\alpha)} \left(\frac{ba}{2} \right)^\alpha K_{\alpha-1}(ba) \quad \text{avec} \quad b = 2\sqrt{\frac{\alpha}{\mu_N \cdot u}} \quad \text{et} \quad u = \frac{\mu_R}{\mu_N}$$

Ce modèle est étendu à la modélisation des scènes naturelles dans [JAO84]. J.K. Jao expose deux approches pour appliquer le caractère aléatoire de N et la loi K à l'amplitude radar :

- la moyenne de N , μ_N , est aléatoire et modélisée par une loi χ^2 . La variable N conditionnellement à μ_N suit une loi de Poisson et N suit comme précédemment une loi binomiale négative.
- l'angle d'incidence et la taille de la cellule de résolution sont introduits dans le processus de naissance, mort et immigration de N . Ceci permet de faire le lien entre les conditions de prise de vue et les paramètres de forme (α) et d'échelle (b) de la loi K.

I.4.2.2. Présence de réflecteurs déterministes dans la cellule de résolution

Le modèle le plus simple est de considérer que la cellule de résolution contient un seul réflecteur déterministe, donnant lieu à une contribution élémentaire de forte amplitude, a_0 :

$$E = A e^{i\Phi} = \sum_{k=1}^N a_k e^{i\varphi_k} + a_0 e^{i\varphi_0}$$

En suivant le même raisonnement que dans le cas homogène, on obtient que l'amplitude suit une loi de Rice qui tend vers la loi de Rayleigh en $a_0 = 0$:

$$p_A(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2 + a_0^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{aa_0}{\sigma^2}\right), \quad E(a^2) = 2\sigma^2 + a_0^2 \quad \text{éq. 1-14}$$

Même lorsque la participation du réflecteur déterministe est faible ($a_0/\sigma > 2\%$), la moyenne de l'amplitude dans l'image atteint a_0 [GOUINAUD96]. Le modèle se généralise pour L pixels ou L vues [SIJBERS98] :

$$p_{A_L}(a) = \frac{aL}{\sigma^2} \left(\frac{a}{a_0}\right)^{L-1} \exp\left(-L\frac{a^2 + a_0^2}{2\sigma^2}\right) I_{L-1}\left(\frac{aa_0L}{\sigma^2}\right)$$

Cependant, l'explication physique de cette loi - un seul réflecteur - est un cas rare. Dans [BARAKAT86], le caractère directionnel des échos est pris en compte par l'utilisation de la loi de Von Mises pour décrire la phase des champs élémentaires :

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi I_0(\nu)} \exp(\nu \cos\theta) \quad \text{avec } \nu > 0$$

La distribution de la phase tend vers le cas uniforme si $\nu = 0$ et presque gaussien si $\nu \rightarrow \infty$. Le paramètre ν caractérise donc le speckle, totalement ou partiellement développé. Avec N décrit par la loi binomiale négative et dont la moyenne tend vers l'infini, la phase du champ résultant suit une loi de Von Mises et l'amplitude la loi K généralisée qui se présente comme un mélange entre loi de Rice et loi K. En faisant le lien avec les notations précédentes, la densité se met sous la forme :

$$p_A(a) = \frac{8(1+c^2)}{\Gamma(\alpha)} \left(\frac{ba}{2\sqrt{1+c^2}}\right)^\alpha I_0(cba) K_{\alpha-1}(\sqrt{1+c^2}ba), \quad \text{avec } b = 2\sqrt{\frac{\alpha}{\mu_N u}} \quad \text{et } c = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu_N v}{\alpha}}$$

Lorsque $\nu = 0$, c'est-à-dire pour une phase uniformément distribuée, on retrouve la loi K. Lorsque $\alpha \rightarrow \infty$, c'est-à-dire pour N distribué par une loi de Poisson, on obtient une loi proche de Rice.

Récemment, D. Petit [PETIT01b] donne une modélisation des zones à phase corrélée, résultant d'effets spéculaires, d'artefacts ou de certaines zones homogènes. Il exprime le champ en un pixel après intégration par la fonction de transfert du système radar, modélisée par un sinus cardinal. Les calculs aboutissent à une expression du champ moyen rétrodiffusé qui dépend entre autre de deux rapports : résolution sur longueur d'onde et taille du pixel sur longueur d'onde. Dans l'hypothèse que le comportement déterministe de la phase est associé à une forte amplitude du champ moyen, il en déduit des conditions sur ces rapports pour prévoir le comportement déterministe ou stochastique de la phase.

1.4.2.3. Approches empiriques

Les modèles précédents s'appuient sur une modélisation physique de la scène et des phénomènes d'interactions entre surface et onde. La difficulté à décrire rigoureusement les phénomènes physiques a finalement orienté certains travaux vers la recherche de la ddp de l'intensité parmi un ensemble de lois possibles. Ces approches empiriques consistent à retenir la loi statistique qui approche au mieux l'histogramme empirique sur l'image sans autre justification théorique.

Ainsi, les lois Lognormale et de Weibull, dont les histogrammes sont plus allongés que ceux des lois Gamma ou K, ont été utilisées pour modéliser l'amplitude en présence de cibles ([TRUNK70], [GOLDSTEI73]). L'intérêt de la loi de Weibull est qu'elle inclut le cas particulier de Rayleigh. H. Laur [LAUR89] considère les lois Gamma, χ , K, Lognormale et Weibull pour décrire l'amplitude. Dans son étude, le coefficient de variation local est retenu comme paramètre de texture discriminant. Ainsi, pour un coefficient faible, la zone est homogène et la loi Gamma convient. Pour une zone de valeur intermédiaire comme la forêt, la loi de Weibull ou la loi K aboutissent à un test de Kolmogorov-Smirnov correct. Au delà d'un coefficient de variation de 0.8, correspondant à des zones de forte réflectivité, on est dans une zone urbaine et H. Laur retient la loi Lognormale en précisant que l'adéquation n'est pas toujours bonne au sens du test de Kolmogorov-Smirnov. Pour modéliser l'amplitude des images de surface de la mer, Y. Delignon [DELIGNON93] se place dans un sous-ensemble du système de Pearson : loi de Pearson de type I (Beta de première espèce), III (Gamma), V (Gamma inverse) et VI (Beta de seconde espèce). Il conclut que l'adéquation des modèles dépend des paramètres du capteur et de l'état de la mer dont l'amplitude de la houle.

Lorsque le modèle multiplicatif est valide (éq. 1-12), une seconde approche empirique consiste à fixer la ddp de la réflectivité sous-jacente. Sous hypothèse d'un speckle de loi Gamma, la loi pour l'intensité (ou l'amplitude) est calculée par marginalisation :

$$p_I(i) = \int_r p_I(i/r) p_R(r) dr \quad \text{éq. 1-15}$$

Dans [LEWINSKI83], la réflectivité est de loi uniforme, Gamma, Log-uniforme ou Lognormale. Ainsi, pour une réflectivité de loi Gamma et un speckle de loi Gamma, il retrouve la loi K :

$$\text{Si } p_R(r) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{r^{\alpha-1}}{\mu_R^\alpha} \exp\left(-\frac{r}{\mu_R}\right) \text{ et } p_A(a/r) = \frac{2L^L}{r^L \Gamma(L)} a^{2L-1} \exp\left(-\frac{La^2}{r}\right)$$

$$\text{alors } p_A(a) = \frac{2b}{\Gamma(L)\Gamma(\alpha)} \left(\frac{b,a}{2}\right)^{\alpha+L-1} K_{\alpha-L}(b,a), \text{ avec } b = 2\sqrt{L/\mu_R}$$

Par ailleurs, D.J. Lewinski montre que la loi Lognormale pour l'intensité I est une bonne approximation d'une réflectivité R de loi Lognormale et d'un speckle S de loi Gamma. Y. Delignon [DELIGNON93] utilise le système KUBW : la réflectivité est distribuée suivant une loi de Pearson de type III, VI, V ou I. Toujours pour un speckle de loi Gamma, l'amplitude suit alors respectivement la loi K, hypergéométrique confluyente (U), Beta de seconde espèce ou de Whittaker.

La loi K est actuellement la plus communément utilisée pour modéliser les scènes naturelles, bien que [LOPES90b] souligne l'intérêt de la loi de Whittaker correspondant à une réflectivité sous-jacente de loi Beta de première espèce. En effet, cette dernière approche les lois gaussiennes, Lognormale et Gamma et permet aussi d'inclure les formes d'histogrammes asymétriques à gauche.

I.4.3. Corrélation spatiale du speckle

I.4.3.1. Origine de la corrélation

La distance de corrélation dépend directement des paramètres de l'acquisition. En effet l'intensité en un pixel peut s'exprimer comme la convolution entre l'amplitude reçue et la réponse impulsionnelle, h , modélisant le système imageur [FROST82] :

$$i(x, y) = \iint_{u,v} r(u, v)h(u-x, v-y)dudv$$

Le coefficient de corrélation entre pixels distants de (dx, dy) se calcule par :

$$\Gamma(dx, dy) = E(i(x, y).i(x-dx, y-dy))$$

En supposant les réflectivités indépendantes et stationnaires :

$$\Gamma(dx, dy) = \Gamma(0,0) \frac{\iint_{u,v} h(u, v).h(u+dx, v+dy)dudv}{\iint_{u,v} |h(u, v)|^2 dudv}$$

On en déduit que si le pas d'échantillonnage entre pixels est supérieur à la résolution du système, le speckle n'est pas corrélé spatialement. Cependant, le pas entre pixels est souvent égal à la moitié de la résolution. De plus, en présence d'échos forts et avec l'apodisation, l'étalement du lobe sur plusieurs pixels induit aussi une corrélation. En pratique, la corrélation entre pixels voisins se calcule empiriquement par le coefficient centré et normalisé, pour différentes valeurs de décalage (dx, dy) :

$$\Gamma(dx, dy) = \frac{E[(i(x, y) - \mu_i)(i(x-dx, y-dy) - \mu_i)]}{\sigma_i^2}$$

La figure 1-19 représente les coefficients de corrélation calculés en distance et en azimuth pour plusieurs images radar RAMSES haute résolution contenant des zones homogènes et de nombreux échos forts. On constate que la corrélation s'étale sur 3 pixels environ en distance, ce qui correspond à deux cellules de résolution, le pas étant égal à la moitié de la résolution. En azimuth, elle s'étale sur environ 5 pixels. Les images, en particulier l'image I2, présentent des lignes d'échos forts suivant l'axe azimuthal ce qui explique la corrélation plus forte en azimuth.

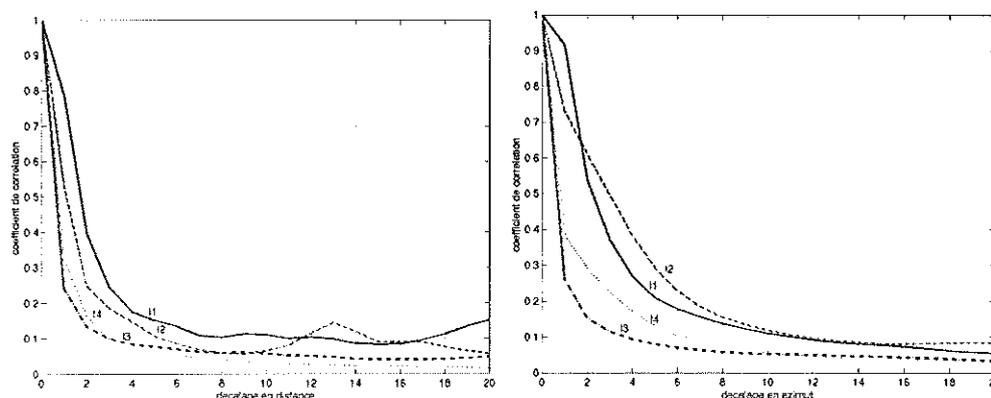


figure 1-19 : coefficients de corrélation empiriques suivant l'axe des distances et l'axe azimuthal pour 4 images, I1, I2, I3 et I4.

I.4.3.2. Modèle statistique d'images corrélées

La moyenne en intensité de L vues corrélées suit une loi de Goodman (rappel issu de [FJORTOFT99]) :

$$p(i) = \sum_{k=1}^L \frac{L}{\lambda_k R \prod_{i \neq k} (1 - \lambda_i / \lambda_k)} \exp\left(-\frac{Li}{\lambda_k}\right), \quad E(I) = R, \quad \text{var}(I) = R^2 / L_{eq}$$

avec λ_k la valeur propre réelle numéro k de la matrice de covariance du speckle.

La moyenne des intensités multi-vue corrélées est égale à la réflectivité sous-jacente comme dans le cas non corrélé, cependant la variance est réduite d'un facteur L_{eq} inférieur à L . La distribution est souvent approchée par une loi Gamma de paramètre L_{eq} , appelé nombre de vues équivalent. L'estimation MM de ce paramètre est égale au carré du coefficient d'homogénéité et caractérise le rapport signal/bruit :

$$L_{eq} = (\gamma_i^2)^{-1} = \frac{\mu_i^2}{\sigma_i^2} \quad \text{éq. 1-16}$$

En pratique, L_{eq} est calculée empiriquement sur une région homogène de l'image.

II. Images RAMSES

Dans cette section, nous présentons les données utilisées. En s'appuyant sur les rappels concernant les phénomènes spéculaires et sur l'étude réalisée quant à leur position relative dans l'image radar (cf. I.3.4), l'interprétation de l'image de quelques structures est proposée. L'analyse statistique de ces images est ensuite mise en œuvre par le biais d'un algorithme de classification non supervisée. Ceci permet de vérifier la validité des modèles statistiques précédents et d'obtenir un premier traitement.

II.1. Présentation des données

II.1.1. Données

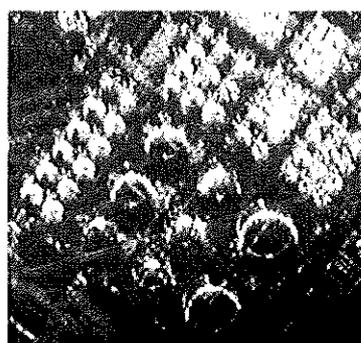
Le capteur expérimental RAMSES (Radar Aéroporté Multi-Spectral d'Etude de Signatures) développé par l'ONERA permet d'acquérir des images haute résolution multi-incidence, toute polarisation et multi-spectrales de la bande P à W [BOUTRY98]. Nous disposons des images d'amplitude codées sur 32 bits et des CPDV. Les données sont mises sous un format d'exploitation propice incluant :

- les positions et vitesses du capteur ainsi que les fréquences Doppler instantanées pour chaque ligne des images. Les positions et vitesses sont relevées par une centrale inertielle et GPS différentiel et corrigées par prise d'amers (cf. I.1.3),
- les paramètres système utiles pour les calculs d'orientation interne et le géoréférencement : NR , TD , PRF , λ et sens de la visée.

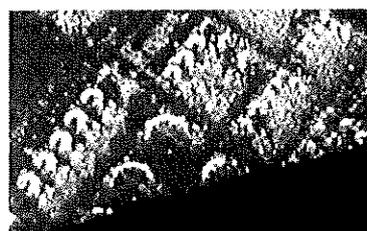
Ces images représentent un site industriel comportant : bâtiments, cuves, pylônes, pipeline, routes, ponts, infrastructures d'activité portuaire et bateaux. Les zones A et B sont des images de cuves (figure 1-20 et figure 1-21). Les zones C et D sont des images de bâtiments (figure 1-22 et figure 1-23). Sur ces figures, les vues ont été géoréférencées, ce qui explique les bandes noires sur les bords des images et sont affichées en 8 bits. A part une image multi-vue à 3 vues (vue 2, zone A), il s'agit d'images mono-vue, donc avec un speckle assez fort. Après géoréférencement, le nombre de vues équivalent peut être supérieur à 2. Les données comprennent des bandes S-polarisation HH, bandes X-polarisation HH et bandes X-polarisation VV. Les images en bande X ne sont pas issues de campagnes stéréoscopiques et les différences d'angles d'incidence sur les zones de recouvrement réduites sont faibles (1 à 5°). Leur opportunité pour la radargrammétrie est discutée dans le chapitre 2. Elles nous permettront cependant de valider les traitements développés en monoculaire. Pour chaque scène, ces vues sont acquises du même côté et avec des trajectoires quasiment parallèles.



vue 1 : 35°, S, HH



vue 2 : 45°, S, HH, image 3 vues

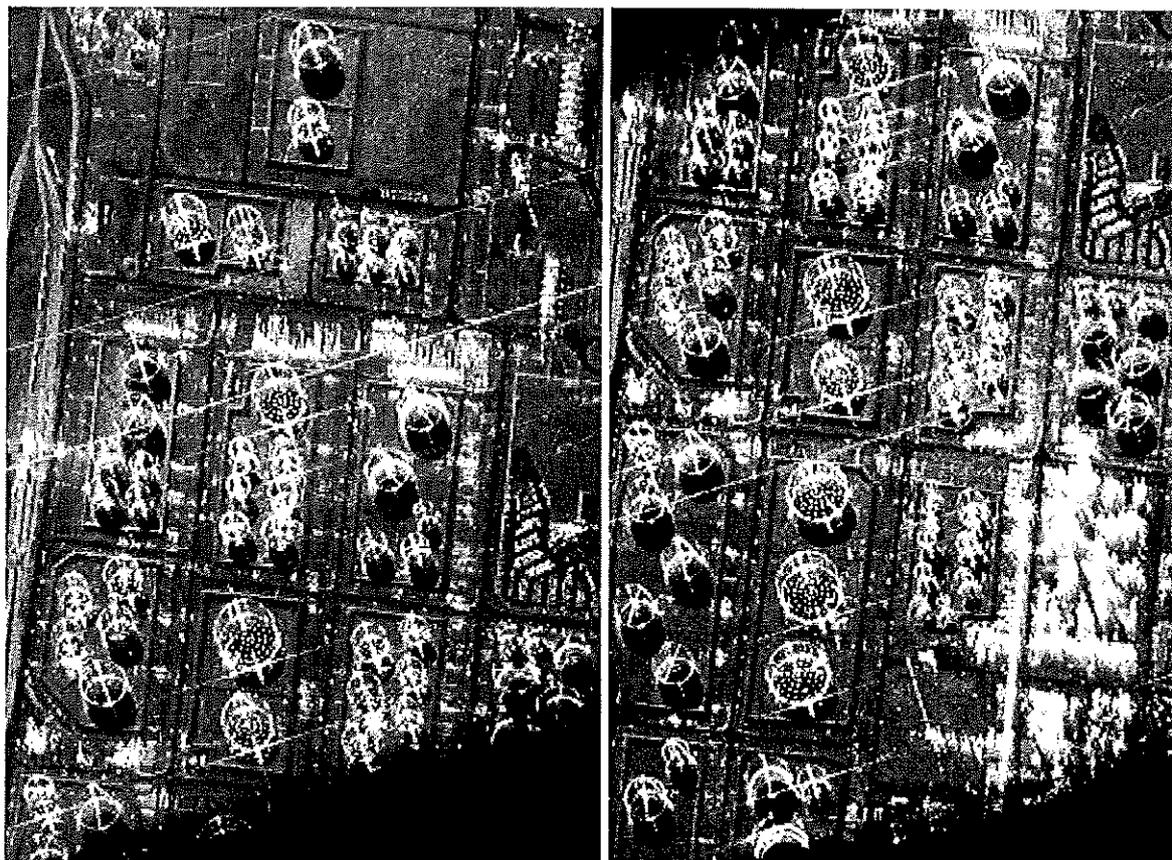


vue 3 : 60°, S, HH



vue 4 : 40°, X, VV

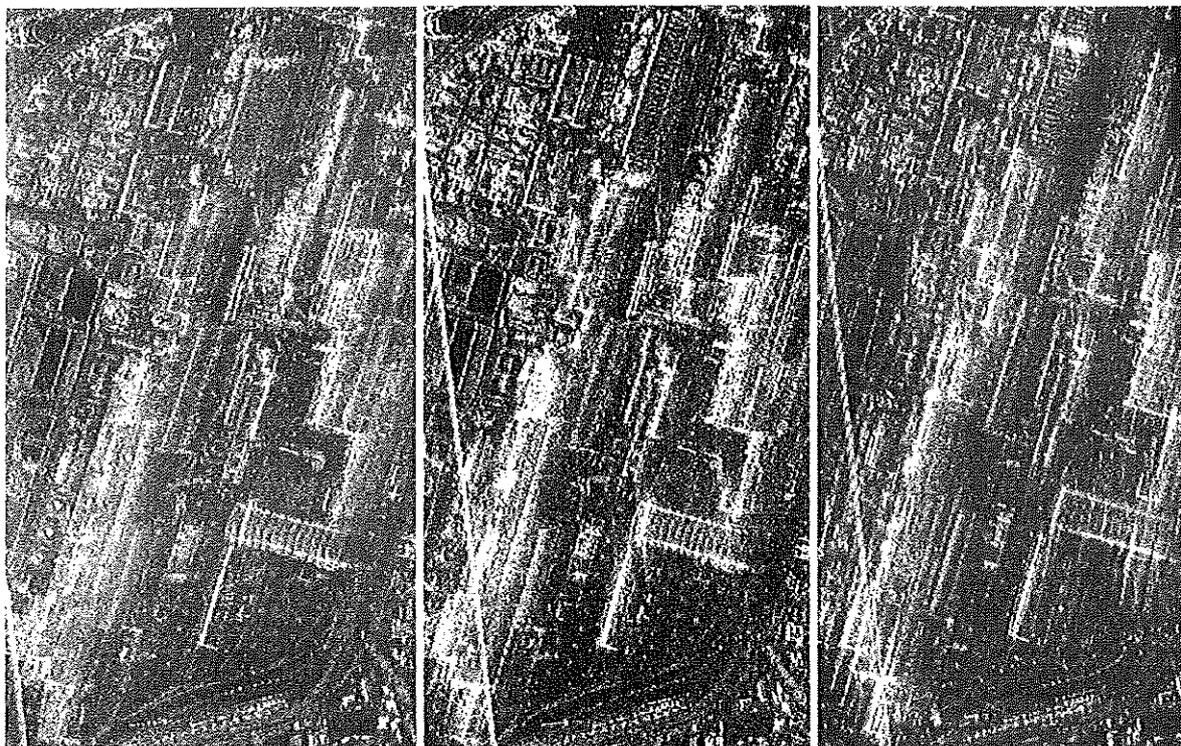
figure 1-20 : ZONE A, images géoréférencées, visée du capteur depuis le nord. L'incidence au centre de l'image, la bande et la polarisation sont indiquées pour chaque vue. Ordre de grandeur de la taille des vues : 350x300



vue 1 : 42°, X, VV

vue 2 : 38°, X, VV

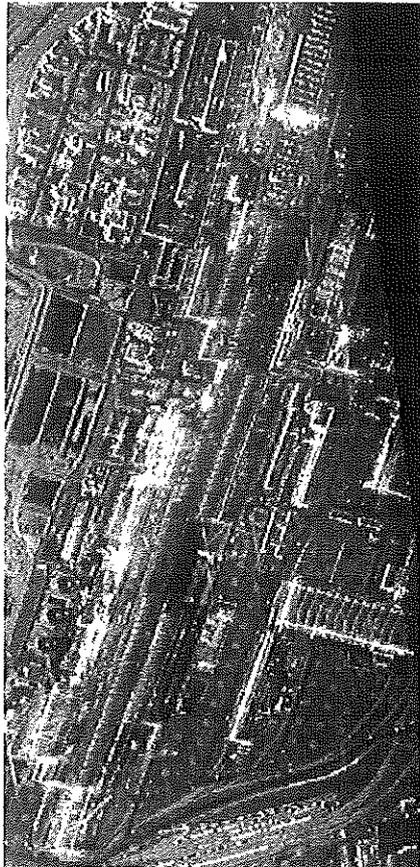
figure 1-21 : ZONE B, images géoréférencées, visée du capteur depuis le nord-ouest. L'incidence au centre de l'image, la bande et la polarisation sont indiquées pour chaque vue. Ordre de grandeur de la taille des images : 600x980



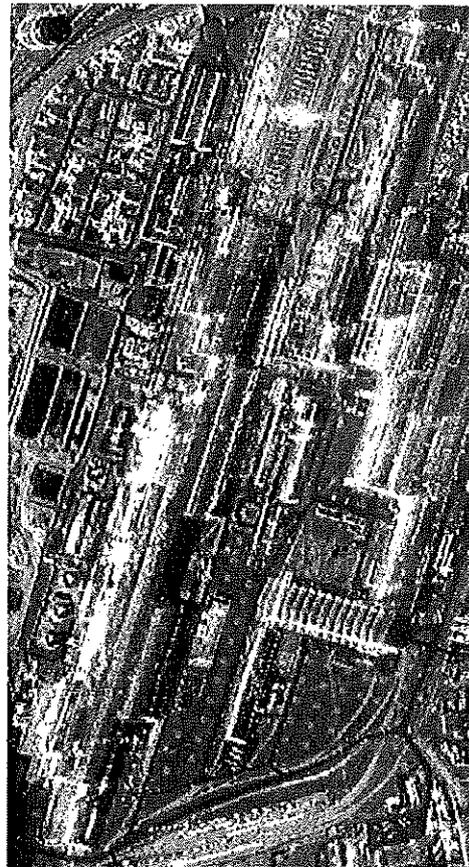
vue 1 : 30°, S, HH

vue 2 : 40°, S, HH

vue 3 : 60°, S, HH

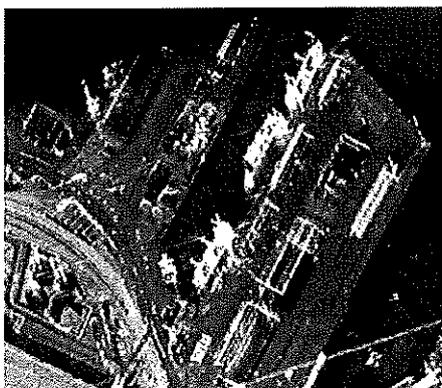


vue 4 : 45°, X, HH

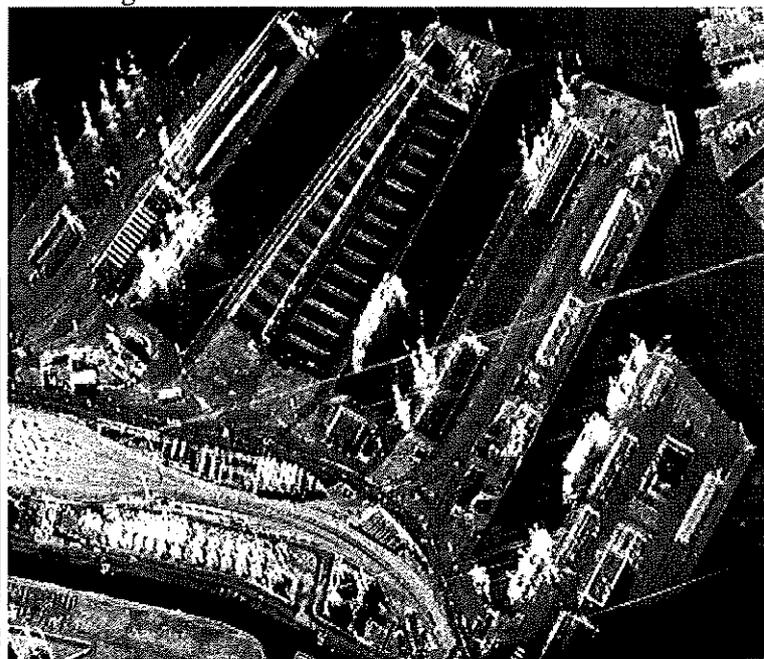


vue 5 : 35°, X, HH

figure 1-22 : ZONE C, images géoréférencées, visée du capteur depuis l'ouest. L'incidence au centre de l'image, la bande et la polarisation sont indiquées pour chaque vue. Ordre de grandeur de la taille des images : 800x1500



vue 1 : 35°, X, VV, 670x640



vue 2 : 40°, X, VV, 1050x940

figure 1-23 : ZONE D, images géoréférencées, visée du capteur depuis le nord-ouest. L'incidence au centre de l'image, la bande, la polarisation et la taille sont indiquées pour chaque vue

II.1.2. Interprétation d'images de structures

II.1.2.1. Premières observations

Si on retrouve bien les formes typiques en 'L' des bâtiments, la différence majeure avec les images de moins bonne résolution est que l'on voit nettement la répétition de plusieurs échos forts distincts pour certaines structures. Cet effet est facilement repérable sur les images de la zone B où les cuves apparaissent sous forme d'un ou de plusieurs arcs de cercle brillants (figure 1-21). En bande S-polarisation HH, les ombres, les toits plats et le sol ne sont pas distinguables (figure 1-22). D'après ce qui précède, ceci est dû au choix de la bande, de la polarisation et éventuellement du réglage du contraste mais est aussi lié à la disposition des objets dans la scène. Les images en bande X présentent davantage de texture, permettant alors de distinguer quelques ombres et quelques toits (figure 1-23).

Ces remarques concernent les structures de taille moyenne ou grande. Les petits bâtiments sont difficilement localisables. En effet, ils sont souvent confondus avec le sol sur les images en bande S. En présence d'échos forts ou de texture, il est difficile, voire impossible, d'affirmer s'il s'agit d'un bâtiment ou non et d'en trouver les bords. Ainsi, d'après les réalités terrain (ANNEXE C), entre 50 et 80% des bâtiments de taille moyenne forment un 'L' brillant et généralement 100% des grands bâtiments.

D'après les phénomènes de rebonds multiples et l'étude de leur arrangement spatial dans l'image radar (I.3.4.4), nous interprétons ci-dessous l'image pour quelques structures.

II.1.2.2. Interprétation d'images de cuves

Les cuves simples sont représentées par deux arcs d'échos forts (figure 1-24) :

- le premier écho est issu du bord du toit. Il se réduit parfois à deux spots, en particulier sur les images en bande S,
- le second est l'écho double en forme d'arc large et brillant.

On constate l'absence de texture entre le premier écho du bord du toit et l'écho double. Le toit se comportant comme un miroir, on visualise essentiellement le sol. En l'absence de texture entre ces deux échos forts, l'image d'une cuve semble donc se répéter plusieurs fois.

L'image en bande X permet de visualiser en plus un écho triple moins fort que les deux premiers et de même forme. Entre l'écho double et l'écho triple, le sol semble toujours visible. Il est probable que des rebonds triples entre le sol et le long du mur aient lieu tel que le sol soit visible entre l'écho double et jusqu'à l'écho triple. Au-delà du rebond triple, on ne visualise que la rétrodiffusion du toit. Celui-ci apparaît noir par effet miroir. L'ombre venant en prolongement semble donc circulaire.

L'intensité de l'écho double paraît plus forte que celle de l'écho simple issu du bord du toit. L'écho double est également plus large après traitement SAR et apodisation. De plus, nous n'observons pas l'épaississement de l'écho double dû à l'angle entre la tangente au mur et la direction de visée (cf. I.3.4.2.1). Ce phénomène semble donc bien confondu avec l'étalement de l'écho fort suite au traitement SAR. L'intensité de l'écho triple semble quant à elle plus faible que celle des échos simples et doubles.

On peut remarquer que les amplitudes le long des échos doubles et des échos du bord du toit sont irrégulières. Tout se passe comme s'ils étaient constitués par un ensemble d'échos forts ponctuels.

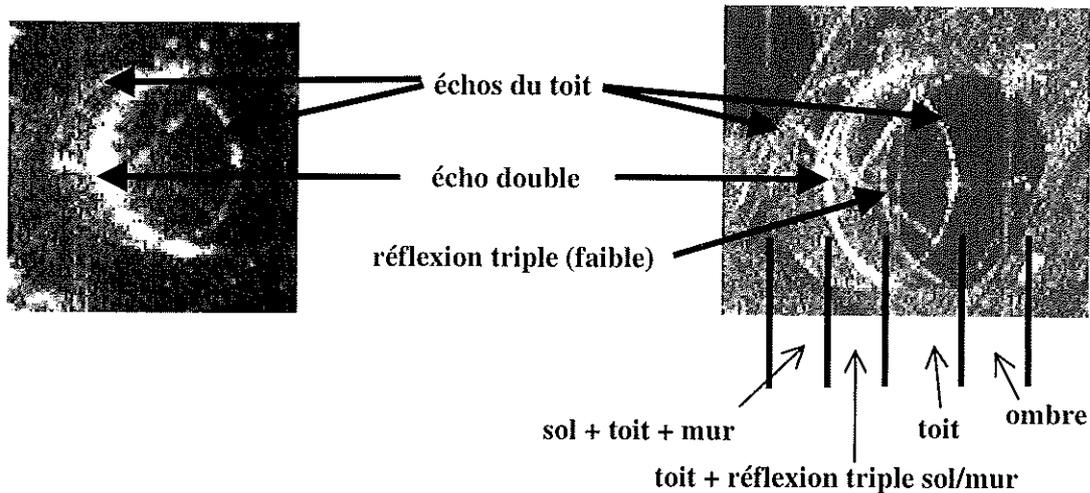


figure 1-24 : interprétation des images d'une cuve simple en bande S et en bande X

La figure 1-25 montre l'interprétation de l'image radar d'une cuve à toit flottant en bande X lorsque le toit est en position basse. On visualise l'écho du bord du toit, l'écho double, un écho triple du bord du toit et un écho du coin diédrique formé à l'intérieur de la cuve (communication du CELAR, 2000). Le toit apparaît sous forme d'échos ponctuels qui correspondent à des pics situés sur le toit flottant. Comme dans l'exemple de la cuve simple et pour les mêmes raisons, le sol est visible entre l'écho double et l'écho triple et l'ombre paraît circulaire.

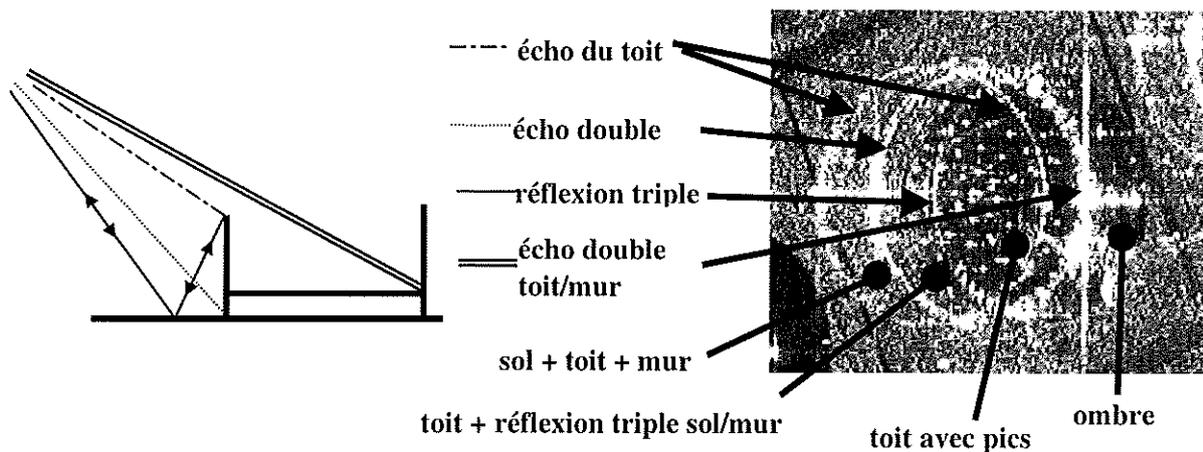


figure 1-25 : interprétation de l'image d'une cuve à toit flottant en bande X

II.1.2.3. Exemples d'images de bâtiments

Pour les bâtiments, l'écho résultant de la réflexion du bord du toit est assez faible par rapport à l'écho double et apparaît sous forme d'échos forts ponctuels alignés et espacés entre eux. La figure 1-26 montre l'exemple de bâtiments à toit non texturé et la figure 1-27 celui d'un bâtiment à toit texturé. Les profils d'amplitude montrent la forte variabilité des amplitudes le long des échos doubles. Dans le cas de toits pentus ou fortement bombés, le toit apparaît partiellement texturé de part l'effet de compression.

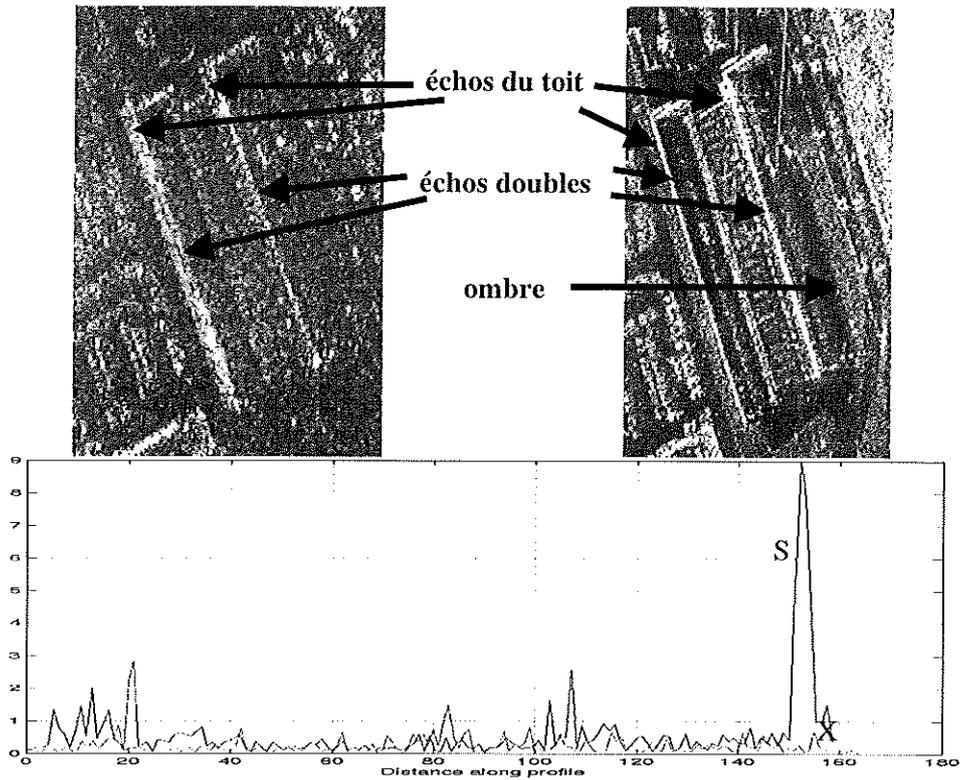


figure 1-26 : images radar de bâtiments à toit non texturé en bande S et X et profils d'amplitudes le long du plus long mur sur l'écho double

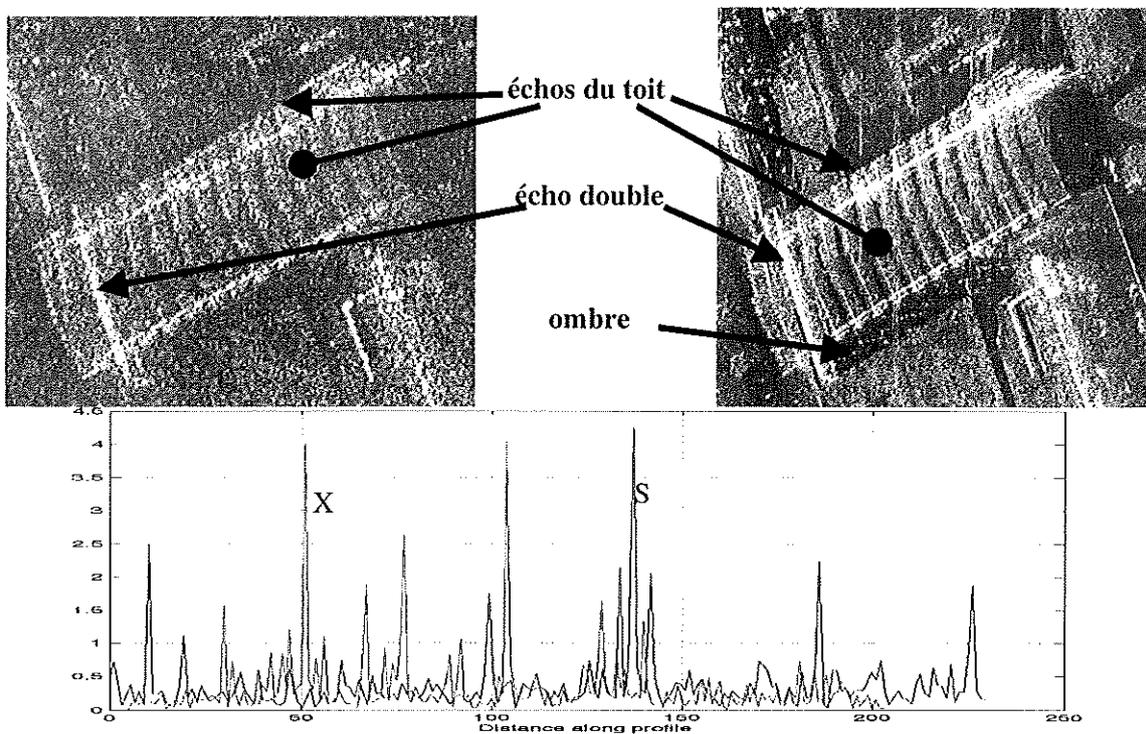


figure 1-27 : images radar d'un bâtiment à toit texturé pentu en bande S et X et profils d'amplitudes le long du plus long mur sur l'écho double

II.2. Etude statistique des images RAMSES

II.2.1. Dynamique et seuillage

La dynamique des niveaux de gris est très grande : amplitudes entre 0 et quelques centaines alors que la différence moyenne est inférieure à 0.1 entre les pixels foncés correspondants au sol, à l'ombre ou aux effets miroirs. Cette valeur peut être comparée avec le $N\sigma_0$ (*Noise Equivalent Sigma Zero*) qui se mesure sur une zone d'ombre. Pour nos données, il est entre -17 et $-30\text{dBm}^2/\text{m}^2$, soit inférieur à 0.1. On constate que grossièrement les valeurs d'intensité ou d'amplitude inférieures à 0dB correspondent au sol (figure 1-28). En effet, le PSLR (*Peak Sidelobe Ratio*) évalué sur un trièdre est autour de -20dB , soit un rapport 10 entre amplitude du pic des échos forts et amplitude au sol.

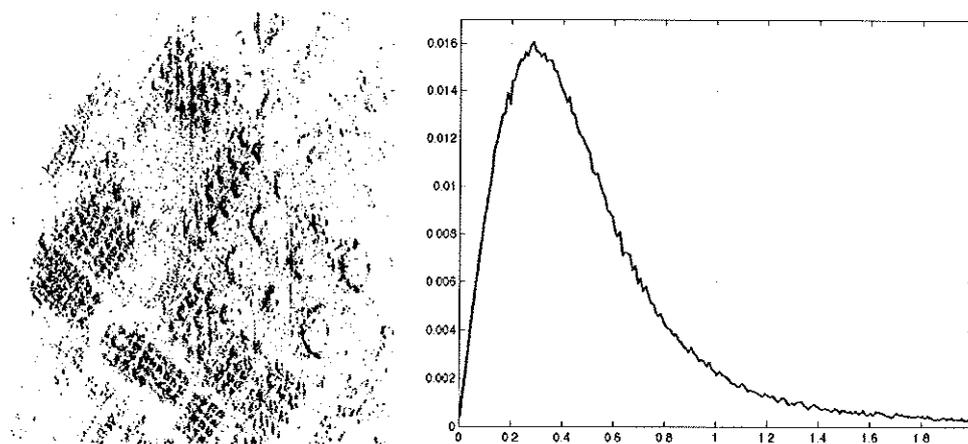


figure 1-28 : vue 1 zone A (figure 1-20) en géométrie radar après seuillage des valeurs supérieures à 0dB qui représentent 12% des pixels. Histogramme normalisé des amplitudes sur tous les pixels

En écrêtant les valeurs les plus hautes (0.1% des pixels de valeurs maximales), on se ramène à une plage des amplitudes beaucoup plus faible : entre 0 et quelques dizaines. Ce 'seuillage' peut permettre de convertir les images d'amplitude sur 16 bits sans perdre en dynamique dans les zones de pixels foncés. Par contre, il ne paraît pas possible de passer en 8 bits sans perdre totalement le contraste dans les zones des échos forts ou sur le sol. Dans la suite, nous choisissons de rester sur 32 bits.

II.2.2. Loïs statistiques des images

Le but est ici de vérifier la cohérence des modèles statistiques classiques avec les images d'amplitude RAMSES. Il est possible de sélectionner une zone homogène facilement, de réaliser un test du χ^2 ou de Kolmogorov-Smirnov pour différentes lois théoriques et de conclure sur la distribution suivie par la région. Par contre, la sélection d'une zone d'échos forts est moins aisée. Ces zones sont souvent petites et de forme quelconque. Par simple seuillage, la classification entre le sol et les échos forts est insatisfaisante à cause du bruit et ce, malgré la suppression des pixels isolés. La prise en compte du voisinage est nécessaire pour améliorer ce résultat. Nous proposons alors d'utiliser un algorithme de classification markovienne non supervisée.

II.2.2.1. Analyse par l'algorithme de classification ICE-MPM-GEMI

II.2.2.1.1. Composition des images

Pour les images S-HH, on peut dénombrer trois classes :

- sol,
- classe intermédiaire (certains toits ou végétation),
- zone à forte densité d'échos forts.

Pour les images X-VV et X-HH, on compte une classe supplémentaire :

- pixels foncés (ombre, eau ou autre).

Ces classes sont susceptibles de suivre des lois différentes (Gamma, Rice, etc). Nous utilisons un algorithme de classification non supervisée reposant sur des chaînes de Markov cachées : l'algorithme ICE-MPM-GEMI (*Iterative Conditional Estimation - Maximum Posterior Mode - Generalized Mixture*) [GIORDANA96], [FOUQUE02]. Cet algorithme permet précisément de décomposer une image en classes de distributions différentes, c'est-à-dire de lois distinctes ou de paramètres de loi différents. A l'issue de cette classification, une loi avec l'estimation de ses paramètres est attribuée à chaque classe. Une description succincte de cet algorithme est proposée dans l'ANNEXE D.

II.2.2.1.2. Fonctions et estimation des paramètres de loi

Par rapport à l'algorithme initial, les lois susceptibles de décrire l'amplitude des images radar haute résolution ont été ajoutées à la liste des distributions possibles. Ainsi, la distribution de l'amplitude est recherchée parmi les lois suivantes (voir la section I.4.3) :

- Gauss
- Gamma généralisée
- K
- Lognormale
- Weibull
- Rice généralisée
- Beta de première espèce
- Beta de seconde espèce

Dans un souci de simplification, la loi K généralisée n'est pas testée. L'estimation de ses paramètres pourra cependant être étudiée en s'appuyant du document [BARAKAT86]. Les trois premières lois sont susceptibles de décrire les régions homogènes ou faiblement texturées tandis que les cinq lois suivantes sont *a priori* plus adaptées à la distribution de la classe des zones à forte densité d'échos forts.

L'estimation des paramètres des lois est déterminante lors de la décision d'affectation d'une loi à une classe qui a lieu à chaque itération de l'algorithme. Par conséquent, cette estimation influe sur le résultat. En plus de l'ajout de lois, nous proposons donc de compléter l'algorithme initial qui utilise l'estimation des paramètres par Maximum de Vraisemblance (MV), par les estimateurs MM et aussi MMI (Méthode des Moments d'ordres Inférieurs) pour les lois Gamma et K. D'après J-M Nicolas [NICOLAS00], une meilleure estimation des paramètres peut en effet être obtenue par MMI dans les régions peu texturées car ces moments privilégient le début de l'histogramme. Le tableau dans

l'ANNEXE B résume les paramètres à estimer, les estimateurs MM et MV pour chaque loi et MMI pour les lois K et Gamma généralisée.

L'estimation des paramètres de la loi de Rice par MM ou MV se heurtant à des problèmes pratiques (cf. ANNEXE B), nous employons une démarche adaptée respectant les recommandations données dans [SIJBERS98] et basée uniquement sur l'estimation MV des deux paramètres de la loi de Rice :

- les classes sont triées dans l'ordre des moyennes croissantes,
- l'estimation commence pour la classe correspondant aux pixels foncés,
- le paramètre σ^2 calculé sur cette classe est ensuite utilisé pour estimer le paramètre a_0 des classes suivantes.

Lors de la classification, les différents estimateurs sont calculés et nous gardons à chaque fois l'estimation qui maximise le critère de ressemblance entre histogrammes empiriques et histogrammes théoriques.

II.2.2.2. Résultats

La classification est effectuée sur les images en géométrie radar et géoréférencées sur un plan d'altitude nulle. En effet, la plupart des traitements décrits dans le chapitre 3 seront appliqués sur les images au sol. Pour les images en bande X, quelques tests ont révélé que la classe des pixels à valeur intermédiaire est souvent à cheval entre la classe des zones à forte densité d'échos forts et la classe des pixels sombres et tend à disparaître lorsque le nombre d'itérations augmente. Les images sont donc traitées en trois classes pour la bande X comme pour la bande S. De plus, la segmentation d'une image en bande S en 2 ou 4 classes a été testée et a parfois mené à une classe composée d'échos très forts et décrite par une loi de Rice. Le résultat confirme l'adéquation de ce modèle théorique mais ne présente pas la séparation visuelle entre les régions brillantes et le sol telle que nous la recherchons.

La figure 1-29 présente deux exemples de classification obtenus sur des images S-HH et deux autres sur des images X-VV. Les résultats semblent satisfaisants. On constate cependant que le mode de parcours 1-D de l'image lors de la classification produit la perte de connexité le long de certaines lignes d'échos forts. L'utilisation d'une modélisation markovienne par champs amoindrirait probablement cet effet mais au prix d'un temps de calcul beaucoup plus long pour ces images de grande taille. Le résultat de la segmentation fait apparaître qu'il n'est pas possible de retrouver les toits et les ombres des structures en bande S. Les échos doubles, en forme de 'L' pour les bâtiments et d'arcs de cercle pour les cuves, sont par contre relativement bien dissociés des deux autres classes de pixels. Pour les images en bande X, les ombres sont repérables sur les résultats. On remarque que leurs bords sont imprécis à cause des toits noirs du fait de l'effet miroir et qu'elles n'existent pas pour toutes les structures. Les échos doubles sont à nouveau bien séparés des deux autres classes.

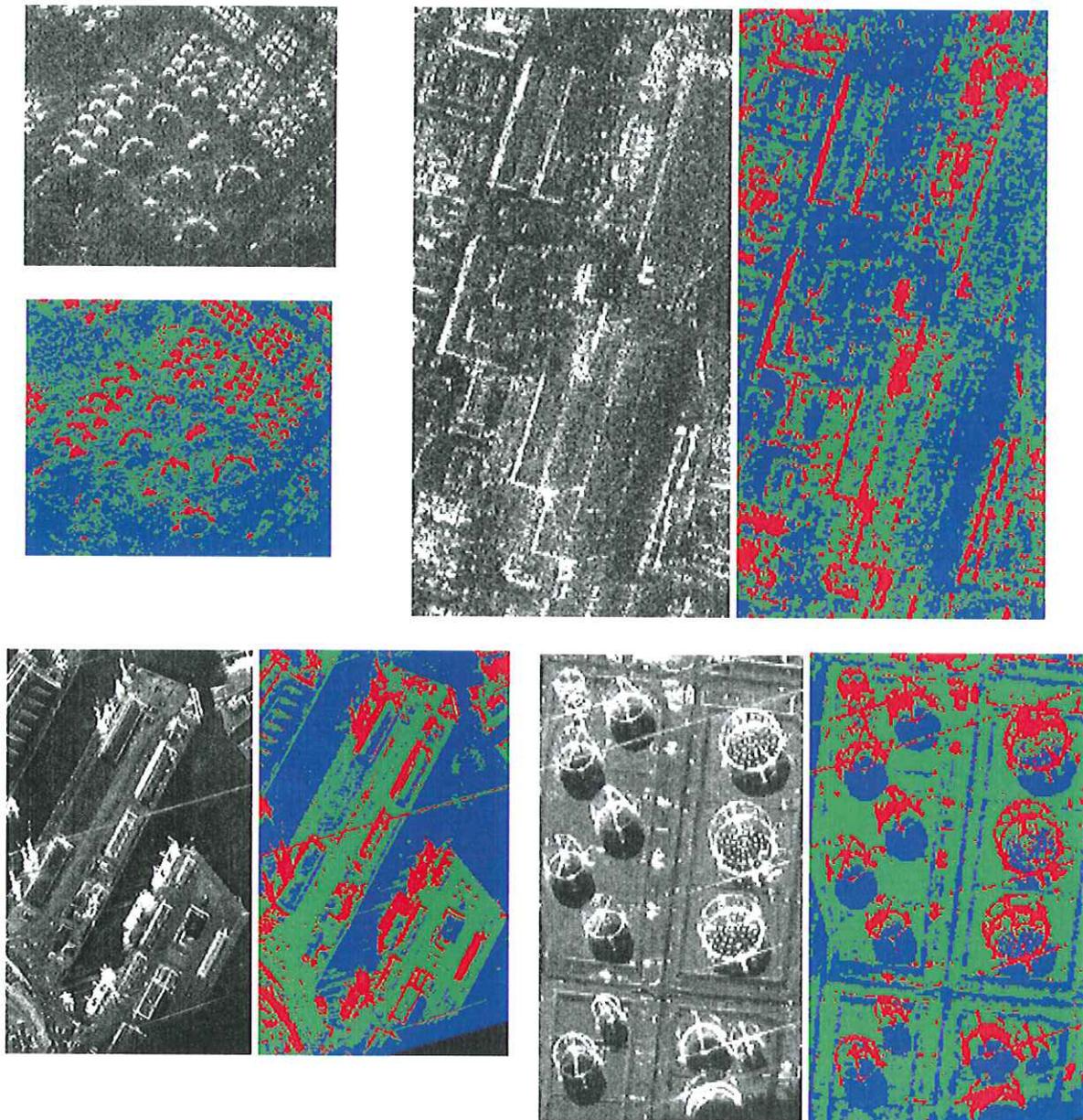


figure 1-29 : résultats de classification sur deux vues en bande S : vue 1, zone A et partie de la vue 1, zone C puis sur deux vues en bande X : partie de la vue 2, zone D et de la vue 2, zone B.

La classification n'assure pas que la distribution réelle soit donnée par la fonction attribuée. La validité de la distribution peut être vérifiée d'après la distance EQM calculée entre les histogrammes empiriques et théoriques ou par test de Kolmogorov-Smirnov (TKS). Les tableaux de l'ANNEXE D résument les ddp attribuées par l'algorithme de classification sur les 13 images d'amplitude dans les deux géométries ainsi que les mesures des distances EQM et la réponse du TKS pour la loi Lognormale. On observe les points suivants pour chaque classe :

- la classe des régions à forte densité d'échos forts : la distribution la plus proche des histogrammes réels est la loi **Lognormale**, trouvée sur toutes les images dans les deux géométries. Comme il a été souligné dans [LAUR89], l'adéquation des histogrammes n'est pas excellente, même si elle est bien meilleure qu'avec une loi Gamma généralisée (figure 1-30). Ainsi les TKS sont toujours négatifs (voir le dernier tableau dans l'ANNEXE D). Cependant, les distances EQM calculées sur tout l'histogramme sont inférieures à 1%, ce qui nous semble suffisant pour dire que la loi

Lognormale donne une approximation acceptable de la ddp. L'utilisation de la loi K généralisée permettrait peut être d'améliorer l'analyse.

- la classe sol (pixels à valeur d'amplitude intermédiaire): une distribution **Lognormale** est également trouvée pour toutes les images. Cette fois, le TKS est toujours positif et les distances EQM également inférieures à 1%. Sur la figure 1-30, on observe visuellement la meilleure adéquation de la loi Lognormale par rapport à la loi Gamma généralisée. La fonction Lognormale est au-dessus de l'histogramme réel et la fonction Gamma généralisée en dessous.
- la classe des pixels sombres est décrite par une loi **Lognormale** ou une loi **Gamma généralisée**. On vérifie que la loi Lognormale peut être utilisée pour décrire cette classe car les distances EQM à cette loi sont inférieures à 1% et le TKS est positif dans presque tous les cas (voir le dernier tableau dans l'ANNEXE D). La similitude des deux fonctions est apparente sur la figure 1-30, montrant que la fonction Lognormale est au-dessus de l'histogramme réel et la fonction Gamma généralisée en dessous. Des ddp gaussiennes sont parfois trouvées. Ce résultat n'est pas étonnant. En effet, le géoréférencement a un effet de lissage qui augmente le nombre de vues équivalent. La loi tend alors vers une gaussienne, ce qui est le cas pour l'image 3-vues de la zone A.

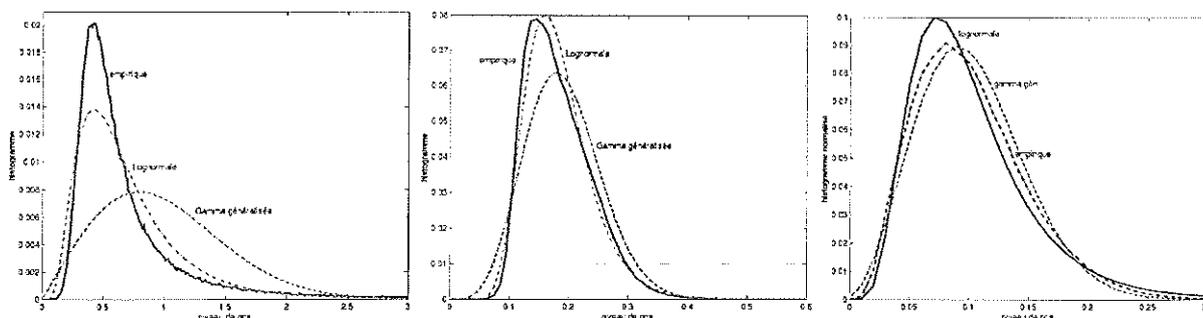


figure 1-30 : comparaison des histogrammes empiriques et théoriques (loi Gamma généralisée et loi Lognormale) pour les classes : régions d'échos forts, pixels intermédiaires et pixels sombres, sur des images géoréférencées. L'écart entre le pic de l'histogramme empirique et celui de la loi Lognormale vaut respectivement environ 0.006, 0.001 et 0.01

Nous pouvons conclure que la loi Lognormale peut s'appliquer pour toute l'image, de manière approximative pour les régions brillantes.

Le relevé des moyennes, écart-types et coefficients de variation pour chaque classe et pour chaque image a été réalisé (voir le troisième tableau dans l'ANNEXE D). Le chevauchement des domaines de variation des moyennes ou des écart-types ne permet pas de donner de conclusions exploitables. Par contre, nous retrouvons précisément la même valeur minimale que dans [LAUR89] de 0.8 pour le coefficient de variation de la classe des régions à fortes densité d'échos forts.

III. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons rappelé l'ensemble des notions importantes pour la compréhension des images (synthèse, effets du relief, effets spéculaires, rebonds doubles et triples) et pour leur utilisation dans des applications cartographiques (repères utilisés, géométrie radar et géométrie terrain, relations de passage terrain/image). De plus, l'organisation spatiale dans l'image radar des échos résultant de rebonds simples, doubles et triples, a été précisée d'après les expressions

des distances radar correspondantes. Les modèles statistiques de l'amplitude et de la phase des images ont ensuite été évoqués.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux images RAMSES. Ces images présentent de nombreux échos forts sur les structures et peu de texture, surtout en bande S. Nous avons proposé une interprétation simplifiée de quelques images de structures grâce à l'étude menée sur les positions relatives des différents types de réflexions, directes et indirectes. Cette interprétation repose sur l'observation de données copolaires pour des bandes S et X et seuls les phénomènes de rétrodiffusions et de réflexions sont considérés. Ainsi, les structures apparaissent sous forme de deux ou plus échos forts en forme d'arcs pour les cuves et généralement de 'L' pour les bâtiments. Le premier écho correspond au bord du toit. Le second, l'écho double, correspond au coin diédrique sol/structure et aux rebonds doubles dans le dièdre. Entre ces deux échos, la rétrodiffusion du sol prédomine. Les échos forts suivants résultent de rebonds triples. Sur les images en bande S, les ombres ne sont pas visibles et les toits, souvent plats, ne se distinguent pas de la texture du sol. L'écho fort du bord du toit n'est pas toujours facilement repérable : il est assez faible et irrégulier sur les bâtiments et il est représenté par deux spots brillants pour les cuves. En revanche, les objets semblent reconnaissables par l'écho double, fortement signant. L'amplitude le long de ces échos est irrégulière. En effet, les échos doubles, de même que les échos forts du bord du toit, semblent correspondre à un arrangement d'échos forts ponctuels. Enfin, cette analyse concerne les structures de taille moyenne ou grande. Les petites structures sont difficilement repérables et en présence de texture ou d'échos forts, il ne semble visuellement pas possible d'affirmer s'il s'agit d'un bâtiment ou non et d'en trouver les bords.

Les hypothèses du speckle totalement développé et le modèle multiplicatif ne sont pas valables sur les échos forts. Par conséquent, nous avons effectué l'analyse statistique des images par le biais de l'algorithme de classification non supervisée ICE-MPM-GEMI. L'image est segmentée en trois classes : régions à forte densité d'échos forts, pixels intermédiaires, et pixels sombres. La loi Lognormale approche le mieux la distribution de la classe des échos forts. L'adéquation n'est pas vérifiée au sens du test de Kolmogorov-Smirnov mais l'est au sens de la distance EQM. En revanche, la loi Lognormale modélise convenablement la distribution des deux autres classes. Le résultat de la classification confirme qu'il n'est pas possible de retrouver les toits des structures en bande S et en bande X. Les échos doubles sont par contre relativement bien dissociés des deux autres classes. La restitution des structures 3-D ne peut alors reposer que sur l'exploitation des arrangements d'échos forts. Comme on ne sait pas si les échos forts correspondent à un même réflecteur d'une image à l'autre, la pertinence de l'information 3-D qu'ils contiennent doit être vérifiée. Cette question fait l'objet du chapitre suivant qui se penche sur les aspects stéréoscopiques.

Chapitre 2 : Analyse stéréoscopique

L'objectif est ici d'analyser la pertinence de l'information 3-D obtenue à partir des données stéréoscopiques haute résolution : l'analyse géométrique et l'analyse sur les échos forts.

Le principe de la technique stéréoscopique en radar, ou radargrammétrie, est tout d'abord présenté. La radargrammétrie comprend deux étapes : la mise en correspondance des images puis le calcul stéréoscopique aboutissant aux coordonnées 3-D. Nous donnons un état de l'art des méthodes existantes sur la mise en correspondance en imagerie optique et en imagerie radar. La majeure partie des travaux en radar concernent des images de résolution décimétrique. Nous indiquons ensuite les études menées sur le 3-D en radar haute résolution par des approches différentes de la radargrammétrie : l'interférométrie et la mesure monoscopique.

Suite à la mise en correspondance, la précision de la reconstruction 3-D dépend de la qualité géométrique des données et de la configuration stéréoscopique. Nous mentionnons les critères d'évaluation d'une configuration stéréoscopique puis nous proposons un modèle théorique d'estimation des erreurs de reconstruction suivant les erreurs relatives aux CPDV et concernant la mise en correspondance. Ce modèle nous permet d'évaluer le potentiel stéréoscopique des couples RAMSES et de vérifier que la précision du MNE produit est cohérente avec celle attendue.

La seconde phase d'analyse concerne les échos forts. En effet, nous avons vu au chapitre 1 qu'en l'absence de texture sur les toits et de visibilité des ombres, les échos forts représentent les seuls indicateurs sur la présence d'une structure. Cependant, on ne sait pas s'ils peuvent être appariés, c'est-à-dire s'ils correspondent à un même point sur le terrain. La pertinence de l'information 3-D qu'ils contiennent est donc étudiée pour certaines structures à partir des données stéréoscopiques par appariement manuel des échos forts.

I. Etat de l'art sur l'extraction du 3-D

Cet état de l'art a pour objectif de comprendre comment on passe des images au 3-D par stéréo-radargrammétrie. Les travaux menés jusqu'ici concernent des images décamétriques ou qui ne permettent pas de visualiser le bâti. Nous abordons donc dans la section I.2, les études existantes sur le 3-D haute résolution par d'autres techniques : la mesure monoscopique et l'interférométrie.

I.1. La stéréoscopie radar

I.1.1. Modélisation géométrique

I.1.1.1. Principe de la radargrammétrie

La radargrammétrie¹ est une technique de restitution du relief par stéréoscopie. De même que la vision oculaire, le principe repose sur deux images (ou plus) d'une même scène, prises sous des angles de vue différents. Le MNE est obtenu en trois phases :

- la modélisation géométrique : passages image/terrain et image/image,
- la mise en correspondance des images fournissant la carte des disparités en chaque pixel. La disparité est définie par la différence de coordonnées image en ligne et en colonne entre deux points associés,
- le calcul des coordonnées 3-D en chaque pixel du point correspondant sur le terrain à partir des disparités et des CPDV.

Entre les deux images stéréoscopiques, gauche et droite, deux pixels sont homologues s'ils correspondent à un même point sur le terrain. Ce point est localisé à l'intersection des cercles distance-Doppler des deux pixels. La précision de localisation du point reconstruit dépend de l'exactitude des disparités, de la qualité géométrique des données et du pouvoir stéréoscopique de la configuration.

En radar, deux types de configuration sont retenus dans [LAPRADE63] : les images sont acquises du même côté ou depuis des côtés opposés (figure 2-1). Ces configurations permettent en effet de produire :

- des effets stéréoscopiques comparables à ceux obtenus en optique,
- des disparités proches pour une variation d'altitude faible,
- une variation des disparités à altitude constante raisonnable le long de l'axe des distances.

Les trajectoires ne sont pas toujours à la même altitude et sont parallèles ou croisées. La potentialité des différentes configurations est discutée dans la section II.1.

¹ Généralement, on parle de 'radargrammétrie' au lieu de 'stéréo-radargrammétrie'.

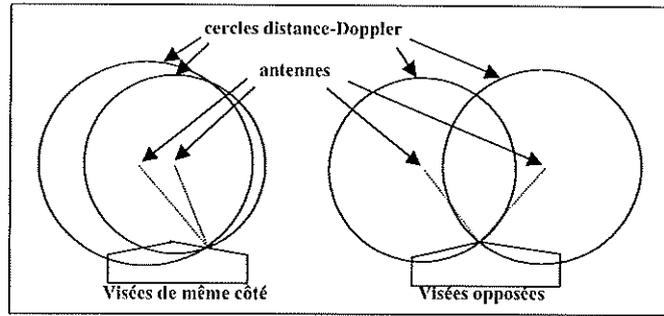


figure 2-1 : deux types de prise de vue pour des trajectoires de même altitude

Pour une configuration donnée, la difficulté est d'établir des méthodes robustes d'appariement des images pour produire la carte des disparités. En effet, en plus du bruit, les images présentent des dissimilarités radiométriques et géométriques dues à l'écart angulaire de prise de vue. Les dissimilarités sont particulièrement importantes en visées opposées où la zone n'est pas vue du même côté.

I.1.1.2. Localisation des points connaissant les disparités

Ayant apparié deux pixels, l'altitude du point correspondant sur le terrain peut être calculée de façon approximative ou rigoureusement.

I.1.1.2.1. Notations

On note (figure 2-2) :

- le référentiel terrestre : $(0, \vec{u}_{11}, \vec{u}_{12}, \vec{u}_{13})$ (longitude, latitude, altitude)
- les coordonnées du point P dans ce référentiel : $X(x_1, x_2, x_3)^T$
- les mesures des paramètres des capteurs gauche et droit à l'instant où P est imagé :
 positions : $S_1(s_1^{11}, s_1^{12}, s_1^{13})^T$ et $S_2(s_2^{11}, s_2^{12}, s_2^{13})^T$
 vitesses : $\vec{V}_1(v_1^{11}, v_1^{12}, v_1^{13})^T$ et $\vec{V}_2(v_2^{11}, v_2^{12}, v_2^{13})^T$
- les distances antenne-cible : r_1 et r_2
- les angles et fréquences Doppler : τ_1, τ_2, f_{D1} et f_{D2}
- les longueurs d'onde : λ_1 et λ_2
- le repère instantané à gauche : $(N_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ avec N_1 le nadir gauche, $\vec{x}_1 = \frac{\vec{V}_1}{V_1}$, $\vec{y}_1 = \vec{z}_1 \wedge \vec{x}_1$ et $\vec{z}_1 = \frac{S_1 N_1}{S_1 N_1}$ (axe des altitudes négatives pour une visée à gauche)
- H_1, H_2 et h , les altitudes des capteurs gauche et droit et celle de P dans le repère gauche
- la distance entre les deux capteurs projetée sur l'axe y_1 : B .

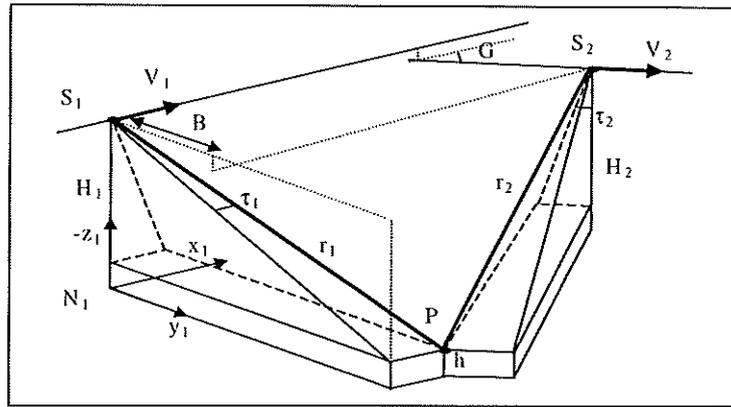


figure 2-2 : configuration stéréoscopique quelconque

I.1.1.2.2. Calcul approximatif

La méthode [LEBERL79] s'appuie sur des relations géométriques (figure 2-3).

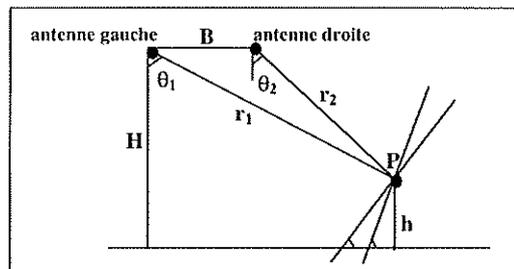


figure 2-3 : disparité dans le cas de trajectoires parallèles à même altitude et angles Doppler nuls

Dans le cas simple de trajectoires parallèles à même altitude et angles Doppler nuls, la disparité est donnée par :

$$d = r_2 - r_1 = (H - h)(\cos^{-1} \theta_2 - \cos^{-1} \theta_1)$$

Il est important de remarquer que la disparité varie en fonction des angles d'incidence à altitude constante, c'est-à-dire le long de l'axe des distances. De plus, on observe que l'erreur sur la mesure d'altitude augmente linéairement avec l'erreur de disparité. Cette équation se généralise pour des angles Doppler non nuls, des altitudes différentes, des trajectoires croisées et des disparités en ligne et en colonne. Cependant les angles d'incidence ne sont pas connus, ils sont donc estimés pour une altitude moyenne donnée. Par ailleurs, on fait l'hypothèse d'un sol plat. Ce calcul fut surtout introduit pour donner facilement une approximation de l'altitude en fonction de la disparité. Il reste utilisé lorsque les CPDV ne sont pas connues dans leur totalité.

I.1.1.2.3. Calcul rigoureux par intersection 3-D

On calcule les coordonnées géographiques du point P par résolution du système d'équations traduisant l'intersection des deux cercles distance-Doppler, gauche et droit. Les coordonnées du point vérifiant [ROSENFIE68] (éq.1-7 et figure 2-1) :

$$\begin{cases} r_1^2 = S_1 P^2, & r_1 \sin \tau_1 V_1 = \overrightarrow{S_1 P} \cdot \overrightarrow{V_1} \\ r_2^2 = S_2 P^2, & r_2 \sin \tau_2 V_2 = \overrightarrow{S_2 P} \cdot \overrightarrow{V_2} \end{cases} \quad \text{éq. 2-1}$$

Nous proposons de le normaliser. Cette normalisation n'est pas indispensable pour le calcul stéréoscopique mais servira lors de l'analyse géométrique des configurations stéréoscopiques dans la section II. Comme le bruit de mise en correspondance intervient dans les images, la normalisation est effectuée sur le système réécrit sous forme de la minimisation de distances image. On note (i_1, j_1) et (i_2, j_2) , les points mesurés sur les images et (i_{est}, j_{est}) , le point estimé résultant de la projection sur l'une des deux images du point P trouvé par calcul stéréoscopique. Nous cherchons à minimiser l'erreur de reprojection, soit la distance pixellique entre le point estimé et le point mesuré. Pour cela, les équations du système sont modifiées en utilisant les équations de l'orientation interne :

$$\begin{cases} r_k^2 - S_k P^2 = (NR_k + TD_k \cdot j_k)^2 - (NR_k + TD_k \cdot j_{est})^2, k = 1,2 \\ r_k \sin \tau_k V_k - S_k \overrightarrow{P.V_k} = S_{ik} \overrightarrow{P.V_{ik}} - S_{iest} \overrightarrow{P.V_{iest}} \end{cases}$$

En négligeant les erreurs du second ordre et les variations de vitesse :

$$\begin{cases} r_k^2 - S_k P^2 = 2NR_k TD_k (j_k - j_{est}) \\ r_k \sin \tau_k V_k - S_k \overrightarrow{P.V_k} = -\frac{V_k^2}{PRF_k} (i_k - i_{est}), k = 1,2 \end{cases}$$

On note : $\sigma_{ik} = 2NR_k TD_k$ et $\sigma_{jk} = \frac{V_k^2}{PRF_k}, k = 1,2$ éq. 2-2

Le système normalisé à résoudre s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{r_k^2 - S_k P^2}{\sigma_{ik}} = 0 \\ \frac{r_k \sin \tau_k V_k - S_k \overrightarrow{P.V_k}}{\sigma_{jk}} = 0 \end{cases}, k = 1,2$$
 éq. 2-3

La résolution de ce système surdimensionné, à quatre équations et trois inconnues, est effectuée par moindres carrés non linéaires (cf. ANNEXE E).

I.1.1.3. Rectification en géométrie épipolaire

I.1.1.3.1. Principe

Pour simplifier l'étape de mise en correspondance des images, on passe généralement en géométrie épipolaire. Dans cette géométrie, une ligne de l'image gauche correspond à une ligne dans l'image droite. Le domaine de recherche des correspondants est alors réduit à un intervalle sur une seule ligne.

En imagerie optique, la modélisation géométrique est celle de la caméra sténopée. Dans ce cas, les droites épipolaires passent toutes par la projection du point caméra de la seconde image dans le plan de la première image. Deux droites épipolaires conjuguées, gauche et droite, passent en plus par deux points homologues. Connaissant des couples de points, les images sont rééchantillonnées le long de ces droites.

En imagerie radar, la notion est étendue en utilisant le procédé décrit dans [GUICHARD87]. Le principe est de projeter un point de l'image gauche sur le terrain pour différentes altitudes. Les points trouvés sont localisés sur l'image droite et forment une courbe. Cette courbe est ensuite projetée dans l'image gauche à altitude variable. Tous les points sur la courbe obtenue dans l'image droite correspondent bien à des points situés sur la courbe de l'image gauche, quelle que soit l'altitude (figure 2-4). Les images en géométrie épipolaire, dites rectifiées, sont obtenues en rééchantillonnant les images initiales suivant ces courbes de telle sorte que les lignes des images produites correspondent aux courbes épipolaires. Pour cela, les valeurs d'intensité des pixels doivent être interpolées. Cette transformation peut donc avoir un effet de lissage mais ne modifie pas la taille des pixels.

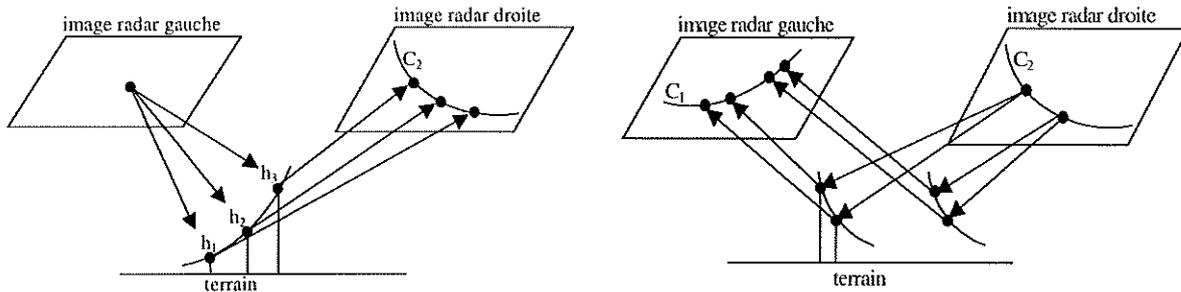


figure 2-4 : définition des courbes homologues C_1 et C_2 (schémas inspirés de [BELGUED99])

I.1.1.3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre a été réalisée par l'ONERA/DTIM. La transformation est effectuée par procédé inverse, c'est-à-dire que l'amplitude en un pixel sur l'image rectifiée est calculée en recherchant sa position dans l'image radar. Le processus est initialisé par la recherche d'un point commun entre les deux images. Sa position dans l'image rectifiée est fixée et la direction épipolaire locale est ensuite calculée suivant le mécanisme expliqué ci-dessus et sur la figure 2-5. Les grilles de passage des images en géométrie épipolaire vers les images radar sont ensuite calculées de proche en proche :

- la position dans l'image radar d'un point de l'image rectifiée est déduite d'après la projection dans l'image radar d'un point voisin déjà traité et de sa direction épipolaire locale,
- la direction épipolaire locale pour le nouveau point est calculée d'après le mécanisme de la figure 2-5.

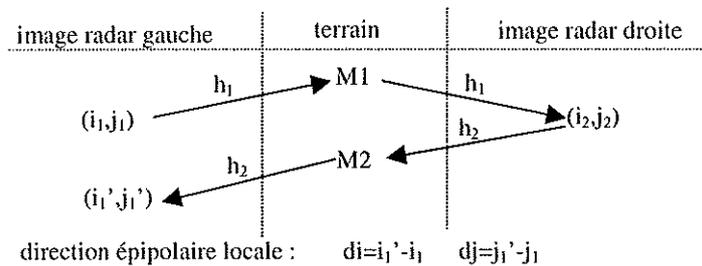


figure 2-5 : calcul de la direction épipolaire locale

I.1.2. Etat de l'art sur la mise en correspondance d'images stéréoscopiques

En basse résolution, les techniques d'appariement d'images radar stéréoscopiques sont directement issues de l'expérience acquise en imagerie optique. Nous précisons donc les techniques utilisées en optique puis les travaux effectués spécifiquement sur des images radar.

I.1.2.1. Contraintes usuelles

Un certain nombre de contraintes locales permettent de restreindre l'ensemble des candidats potentiels à l'appariement :

- Domaine de recherche : en géométrie épipolaire, l'intervalle de recherche est restreint à un intervalle sur la ligne épipolaire conjuguée. Les bornes de disparités minimale et maximale sont généralement fixées d'après l'observation des images mais peuvent aussi être calculées théoriquement d'après les CDPV et les altitudes minimales et maximales possibles.
- Similarité : deux points ou primitives homologues maximisent une fonction de similarité. Cette fonction prend en compte les ressemblances radiométriques (coefficient de corrélation sur les intensités) et géométriques (orientation du contour, longueur, surface de la région, ...). Quelle que soit la technique de mise en correspondance utilisée, un critère de similarité est toujours utilisé. Ce terme comprend très souvent un terme de corrélation.

Des contraintes globales permettent ensuite de contrôler la cohérence des appariements :

- Ordre : on suppose que les éléments se retrouvent dans le même ordre sur les deux images le long des lignes épipolaires.
- Unicité : on suppose qu'un point a un seul correspondant dans l'autre image. En général, cette contrainte est toujours utilisée implicitement, en particulier dans les algorithmes 'aller-retour' (cf. I.1.2.2.3).
- Continuité de la disparité : elle se traduit par une limite sur le gradient de disparité, équivalente à une limite sur la pente du terrain. La contrainte forte suppose que la disparité est continue sur toute l'image. Ceci est vérifié en l'absence de discontinuités du relief. La contrainte de continuité figurale est appliquée uniquement le long des contours.

En radar, la validité des contraintes d'unicité et d'ordre est compromise par les effets de compression et de repliement qui dépendent de la pente du relief et des angles d'incidence. Dans [NOCERA96], un tableau résume le domaine de validité des contraintes en fonction des angles : la contrainte d'ordre est fautive si le repliement a lieu sur une seule image et la contrainte d'unicité n'est pas vérifiée si l'effet de compression est différent d'une image à l'autre.

I.1.2.2. Techniques d'appariement en stéréovision

De nombreuses méthodes sont proposées pour la mise en correspondance d'images optiques. Le principe général est de trouver le point correspondant dans l'image droite pour un point de l'image gauche, qui optimise la fonction de mise en correspondance, C . Ce coût est calculé pour un ensemble de points candidats dans l'image droite, délimité par le domaine de recherche. L'état de l'art succinct que nous proposons ci-dessous s'appuie essentiellement sur celui effectué dans [BAILLARD97].

I.1.2.2.1. Primitives d'appariement

Deux méthodes sont distinguées : l'appariement point à point et l'appariement de primitives. Les primitives utilisées sont de différents niveaux :

- les points d'intérêt autres que les contours, par exemple : les maxima locaux, les pics et vallées des profils d'intensité [HSIEH90], les barycentres des bâtiments [CROSS98],
- les contours : points de contour ou contours chaînés [BAKER81], [JORDAN92], [LOTTI96], [BAILLARD97], segments [AYACHE85], intervalles entre points de contours [OHTA87],
- les régions [LEE90].

L'intérêt de la mise en correspondance de primitives se résume en trois points :

- la mise en correspondance d'objets discriminants de la scène, ce qui rend l'algorithme plus robuste au bruit et aux dissimilarités radiométriques et géométriques entre les deux vues,
- la limitation des erreurs d'appariement par réduction de l'ensemble des correspondants potentiels,
- la diminution du nombre d'éléments à appairer, ce qui rend l'algorithme plus rapide.

Les primitives sont donc utilisées dans le cas de scènes présentant un bruit gênant ou des sauts de disparités. Une difficulté est cependant d'extraire les primitives. De plus, la reconstruction obtenue n'est pas dense. Des approches multi-primitives (régions et contours [PONG89]) ou mixtes, combinant l'approche dense et l'approche primitive (points et pics et vallées [HSIEH90], contours et points entre contours [BAILLARD97]), sont alors parfois utilisées.

I.1.2.2.2. Stratégies

Les principales stratégies d'appariements de points sont :

- la corrélation : le point est apparié avec celui qui maximise le coefficient de corrélation. Les corrélateurs existants seront présentés et discutés dans le chapitre 4. Suivant ce principe, la croissance de région consiste à valider les couples fiables et propager les disparités aux voisins [OTTO89].
- La programmation dynamique : elle sert à résoudre les problèmes d'optimisation sous contraintes. La fonction à minimiser doit être séparable afin de transformer le problème de N variables en N problèmes mono-variable. Pour la mise en correspondance ([BAKER81], [OHTA87]), on recherche le chemin de coût minimal dans un graphe de correspondance selon l'algorithme de Viterbi. Un nœud représente l'appariement potentiel de deux points et une arête porte le coût d'appariement. Cette technique est utilisée dans le chapitre 4.
- La minimisation d'une fonction d'énergie : les disparités sont modifiées itérativement afin de minimiser une fonction sur tout ou partie de l'image. Les critères correspondent aux moindres carrés [GRUEN85] ou à une approche bayésienne [GEIGER95]. La minimisation est réalisée par exemple par gradient conjugué [FUA91]. Dans [ORIOU98a], le coût utilisé contient un terme de régularisation quadratique tronquée, ce qui permet de tolérer des irrégularités d'altitudes. La minimisation est réalisée par GNC.

L'appariement des primitives autres que des points utilise généralement les techniques suivantes :

- la prédiction et vérification d'hypothèses [AYACHE85]. Elle se déroule en trois étapes : la prédiction d'hypothèses initialisant l'algorithme aux appariements les plus fiables, la propagation des hypothèses aux primitives voisines en respectant les contraintes locales et globales puis la vérification d'hypothèses, étape au cours de laquelle les meilleures hypothèses sont gardées en cas de conflit.
- La technique du vote [MA93]. Elle se fait en trois étapes : la recherche des candidats potentiels à l'appariement suivant les contraintes locales, le calcul du coût pour chaque appariement potentiel avec vote des appariements voisins puis la validation des appariements les plus fiables satisfaisant les contraintes globales.
- La correspondance de graphes : les deux images sont décrites sous forme de graphes dont les nœuds sont les éléments à apparier et les arêtes correspondent aux relations de voisinage. On recherche des isomorphismes sur les plus grands sous-graphes possibles.
- La relaxation. Cette méthode comprend trois étapes : l'attribution d'une probabilité à chaque couple candidat, la mise à jour itérative des probabilités suivant le contexte local jusqu'à la convergence puis la sélection des couples de forte probabilité [BARNARD80], [LEE90].

I.1.2.2.3. Techniques d'amélioration

Pour améliorer la qualité des résultats, les variantes suivantes sont souvent utilisées :

- l'approche 'aller-retour' (ou bijective) où seuls les appariements communs à l'issue de la mise en correspondance gauche vers droite et droite vers gauche sont conservés [FUA91].
- L'approche multi-résolution. On y trouve l'approche pyramidale qui consiste à construire une pyramide d'images de taille décroissante – réduction d'un facteur 2 à chaque fois – et à effectuer la mise en correspondance à chaque niveau. Les disparités obtenues à un niveau servent d'initialisation pour le niveau suivant correspondant à une image mieux résolue. Cette information initiale permet de diminuer le domaine de recherche et d'accélérer les traitements. Le problème de cette technique est le risque de propagation des erreurs de disparités dans la pyramide.
- L'approche hiérarchique consiste à apparier des primitives haut-niveau pour terminer par l'appariement des points. On retrouve donc dans cette catégorie certaines approches mixtes [BAILLARD97].

I.1.2.2.4. Interpolation ou correction de la carte des disparités

Après l'appariement de primitives ou la sélection des appariements les plus fiables, la carte des disparités obtenue est éparse et doit être interpolée. Cette densification est effectuée sur la carte elle-même ou sur le MNT après calcul 3-D sur les pixels appariés. Nous pouvons citer les techniques suivantes :

- l'interpolation suivant le contexte local, point à point ou entre les primitives appariées : interpolation bilinéaire [JORDAN92], interpolation par programmation dynamique [BAKER81], [BAILLARD97], interpolation par minimisation d'une fonction globale prenant en compte l'attache aux données et les contraintes [FUA91]. Cette dernière méthode corrige également les valeurs aberrantes.

- la représentation du terrain par des surfaces sur lesquelles s'applique un modèle continu des altitudes ou des disparités. Dans [LUO90], ces surfaces sont définies d'après la segmentation de l'image initiale en régions homogènes. Une région homogène est supposée correspondre à un plan sur le terrain. Une autre possibilité est de former les surfaces par triangulation de la scène, par exemple une triangulation contrainte par segments appariés [BRUZZONE92]. Ce type de méthode corrige les valeurs aberrantes.

I.1.2.2.5. Cartographie des bâtiments

Pour restituer précisément les bords des bâtiments et un modèle d'altitude par structure (altitude unique pour un toit plat ou modèle à plusieurs pentes), les bâtiments doivent être extraits. Cette extraction est réalisée soit sur les images initiales, soit sur la carte des disparités. Pour la première approche, la détection des bâtiments est généralement réalisée sur les deux images initiales par l'extraction des contours et la formation de primitives haut-niveau par exemple par groupement perceptuel. Ces primitives sont ensuite appariées. Dans la seconde approche, les bâtiments sont extraits par la recherche de régions d'altitudes ou de disparités continues. Ainsi, dans [ORIENT98b], une croissance de régions est effectuée sur les intensités si la zone est homogène et sur les disparités sinon. Les bords des régions sont ensuite délimités par transformée de Hough. Dans [DISSARD95], les toits sont extraits par utilisation de modèles plan [LUO90].

I.1.2.3. Etudes radargrammétriques

I.1.2.3.1. Développement

Un état de l'art récent peut être trouvé dans [TOUTIN00]. Deux études cartographiques extra-terrestres ont été menées : la cartographie de la lune dans les années 70 et celle de Vénus avec MAGELLAN dans les années 80 par radargrammétrie et radarclinométrie [LEBERL92]. La mise en correspondance est au début manuelle : pointé de quelques couples par un opérateur puis interpolation du MNT. Les satellites ont ensuite permis d'acquérir davantage de données stéréoscopiques dès les années 80 avec les orbites montantes et descendantes de SIR-B, ERS-1 et JERS-1. Les algorithmes automatiques d'appariement se développent alors considérablement. Mais c'est à partir des années 90 que les satellites SIR-C et RADARSAT offrent enfin les perspectives de recherche attendues pour le développement de la radargrammétrie. Ils sont en effet multi-résolution et surtout multi-incidence. La précision altimétrique du MNT radargrammétrique est aujourd'hui autour de la taille du pixel qui est généralement décimétrique en satellitaire ([RAGGAM98], [SYLVANDE98a] avec RADARSAT), tandis qu'elle était initialement autour de 2.5 à 4 fois la taille du pixel [KOBRIK86].

I.1.2.3.2. Problématique

La mise en correspondance d'images décimétriques est difficile sur les paysages montagneux. La différence des effets de repliement et de compression d'une image à l'autre est en effet responsable de fortes dissimilarités radiométriques et géométriques. De ce fait, les méthodes assistées par un opérateur demeurent plus performantes d'après [LEBERL94] et [TOUTIN00]. En automatique, la qualité des coefficients de corrélation est quant à elle moins bonne sur ces zones [SYLVANDER98a]. Ceci a orienté la recherche vers des techniques de raffinement itératif avec corrections radiométrique et géométrique. Ainsi, dans [RAMAPRYI86] et [FULLERTO86], l'image droite est déformée dans la géométrie de l'image gauche après calcul d'un premier MNT grossier. F. Leberl [LEBERL94] préconise la correction itérative de l'illumination en fonction de la pente. Dans [GELAUTZ96] et [BOLTER98a], une troisième image acquise du côté opposé aux deux autres est utilisée pour contrôler la différence des effets de repliements. Pour cela, les zones de repliement sont d'abord détectées sur

les deux images en visées de même côté. Chaque possibilité d'appariements des points débuts et fins de ces zones est testée en produisant le MNT correspondant. Ce MNT sert à simuler une image dans la géométrie de la vue opposée. La distance radiométrique entre l'image simulée et la troisième vue permet alors de choisir la meilleure hypothèse. Par ailleurs, la rectification épipolaire est surtout utilisée à partir de RADARSAT ([SYLVANDE98a], [HERVET00]).

I.1.2.3.3. Stratégies

Les stratégies de mise en correspondance s'appuient sur les approches utilisées en optique. Nous pouvons citer les exemples suivants :

- la corrélation aller-retour [RAGGAM98],
- la croissance de régions présentée dans [OTTO89] qui est reprise dans [DENOS92] (à partir de germes acquis manuellement) et dans [TWU96]. Un algorithme de croissance de régions est également proposé dans [JACQUIS97],
- la relaxation avec initialisation des probabilités d'après les coefficients de corrélation et la contrainte de continuité de la disparité sur un voisinage [RAMAPRYI86],
- la minimisation globale d'une fonction par recherche tabou [HERVET00]. La recherche Tabou est une méthode d'optimisation stochastique locale. Elle permet à E. Hervet d'intégrer les contraintes voulues sur les appariements : la similarité définie par le coefficient de corrélation calculé sur les images complexes, la contrainte épipolaire, la contrainte d'ordre traduite par un coût pénalisant (il est donc possible de ne pas la respecter), la contrainte sur le gradient de disparité et la contrainte sur le nombre de pixels appariés avec pénalisation du non-appariement.

Du fait du speckle, l'approche multi-échelle est souvent utilisée ([HERVET00], [DENOS92], [RAMAPRYI86], [TWU96], [JACQUIS97], [THOMAS87]). Ainsi, Z.G. Twu et al. [TWU96] constatent que la précision au niveau 1 de la pyramide est meilleure qu'au niveau 0, correspondant à la pleine résolution.

I.1.2.3.4. Approche classique avec pré-traitement et approche adaptée

Actuellement, deux approches de mise en correspondance sont surtout utilisées :

- le filtrage du bruit sur chaque vue puis la mise en correspondance par un algorithme classique,
- l'utilisation d'une fonction de corrélation spécifique aux données radar.

Concernant la première approche, certaines études ont fait ressortir qu'un filtrage permet d'augmenter la couverture des points appariés ([DENOS92], [JACQUIS97]). I. Dowman et al. [DOWMAN93] concluent cependant le contraire après avoir testé l'apport de douze filtres. L'erreur altimétrique avec filtrage est comparable ou meilleure que sans filtrage, avec moins de valeurs aberrantes ([DOWMAN93], [SYLVANDER98a]). Les filtres retenus sont souvent les filtres de Frost, GammaMAP, médian ou moyennage. Le simple moyennage semble être le plus utilisé pour la mise en correspondance ([NOCERA96], [THOMAS87], [RAGGAM98], etc.).

Dans le souci d'éviter le pré-traitement des données et de préserver l'information, certains auteurs se sont intéressés au calcul théorique d'une fonction de corrélation adaptée aux lois statistiques radar de type Gamma ([HERVET00], [NOCERA96]). Elle remplace le coefficient de corrélation qui est généralement utilisé dans les algorithmes classiques. Ces fonctions sont présentées dans le chapitre 4 où nous reviendrons sur le choix de la fonction de corrélation pour les images RAMSES.

Dans [BELGUED99], l'algorithme de [SYLVANDER98a] (filtrage de Frost puis corrélation classique) est comparé avec celui de [HERVET00] (corrélateur adapté et recherche tabou). Y. Belgued et al. concluent que la seconde méthode aboutit à une erreur altimétrique comparable à la première mais avec davantage de bons appariements.

I.1.2.3.5. Primitives

L'utilisation de primitives en radar est assez rare. En effet, à cause du bruit, les contours ou les régions sont difficiles à extraire. Ainsi, F. Leberl [LEBERL90] propose d'utiliser les contours extraits par le détecteur de Marr et Poggio. L'utilisation des contours est par contre rejetée dans [SYLVANDE98a] et [NOCERA96] car, peu nombreux, ils n'apportent pas d'information supplémentaire significative.

I.1.2.3.6. Interpolation ou correction de la carte

Après la sélection des meilleurs appariements, la densification et/ou la correction de la carte est réalisée par différentes méthodes, identiques à celles employées en imagerie optique. Citons par exemple :

- l'interpolation linéaire : à partir des plus proches voisins appariés sur la ligne épipolaire [HERVET00] ou à partir de la recherche d'une droite pour décrire localement les disparités [RAMAPRY86]. Si aucune droite n'est trouvée, une interpolation bicubique est réalisée,
- l'interpolation par triangulation de la scène ([RAGGAM98], [BELGUED99]),
- la minimisation d'un critère d'attache aux données et de régularisation, avec contrainte de continuité [NOCERA96],
- la propagation d'information [JACQUIS97] : l'interpolation est effectuée d'après la position relative des points du voisinage, la contrainte d'ordre et la contrainte de continuité. La propagation est effectuée en plusieurs passes, des points les plus fiables aux moins fiables.

I.1.2.3.7. Améliorations des MNT

Les MNT obtenus ne sont pas toujours de très bonne qualité. En effet, à cause du bruit et des dissimilarités, en particulier sur les hauts reliefs, le MNT est peu dense. Tout en restant dans un contexte radar, les voies d'amélioration abordées dans la littérature sont alors :

- la fusion de plusieurs MNT radargrammétriques construits à partir de couples d'images prises dans des conditions différentes (visée, incidence, ...). Pour s'affranchir du compromis entre similarités radiométriques et précision géométrique, I.V. Elizavetin [ELIZAVET00] propose de calculer les disparités entre deux images successives d'une séquence d'images RADARSAT tandis que le calcul 3-D est effectué sur le couple le plus éloigné. La disparité pour le couple le plus éloigné résulte de la somme des disparités en pixel entre images consécutives de la séquence.
- La fusion de plusieurs méthodes de restitution du relief, par exemple la correction des disparités en affinant le MNT radargrammétrique par radarclinométrie. Cette technique, nommée radarclinométrie multi-images, a été utilisée entre autre pour la cartographie de la planète Vénus ([LEBERL92], [BOLTER98b], [NOCERA96]).

I.1.2.4. Limitations des erreurs d'appariement par corrélation

Que ce soit en imagerie radar ou optique, le coefficient de corrélation est généralement utilisé dans la fonction de similarité. La corrélation est sensible au bruit et n'est pas discriminante dans les régions totalement homogènes ou à texture périodique. Pour diminuer le nombre de faux appariements, des contraintes globales et locales peuvent être ajoutées sur la similarité. En global, le nombre maximal de points appariés est fixé ou un seuil sur les coefficients de corrélation est choisi. En local, la courbe des coefficients de corrélation entre un point et les candidats potentiels à l'appariement sur l'autre image, est analysée. Pour écarter les cas ambigus ou trop imprécis, un seuil peut être fixé sur :

- la hauteur relative du pic principal par rapport aux pics secondaires. Elle traduit l'ambiguïté et doit être la plus grande possible,
- la pente de la courbe formée par l'arrangement croissant des coefficients [OLLER01]. Cette pente y est calculée sur 30% des valeurs maximales. Elle doit être la plus grande possible,
- la largeur du pic qui caractérise l'imprécision et doit donc être étroite.

Dans [DEJOINVI01], une carte de fiabilité est produite par la combinaison linéaire de trois mesures en chaque point : le coefficient de corrélation, l'ambiguïté et l'imprécision. L'ambiguïté y est mesurée par la distance entre les deux pics secondaires entourant le pic principal, de hauteur supérieure à 90% de la hauteur du pic principal. L'imprécision est donnée par la largeur du pic principal mesurée à 75% de sa hauteur. Les coefficients de pondération sont fixés empiriquement. O. de Joinville et al. proposent sinon la combinaison linéaire des moyennes et variances de chaque mesure, calculées sur des sous-domaines du domaine total de variation des mesures. Cette étude montre que l'ambiguïté semble jouer un rôle prépondérant pour détecter les faux appariements.

Une autre difficulté est de choisir correctement la taille de la fenêtre de corrélation. En radar, la fenêtre est plutôt de grande taille, entre 9x9 ([THOMAS86], [NOCERA96]) et jusqu'à 40x40 pixels [LEBERL94]. La taille de la fenêtre doit répondre à un compromis : plus la fenêtre est grande, moins le résultat de la corrélation est sensible au bruit, mais plus il risque de subir l'influence de structures voisines. La solution mise en œuvre en imagerie optique est l'utilisation de fenêtres adaptatives en fonction du contexte local :

- réglage de l'orientation et de la longueur de la fenêtre suivant les contours [LOTTI96],
- calcul du coût d'appariement pour plusieurs tailles de fenêtres et sélection de celui pour lequel l'incertitude sur l'estimation de la disparité est minimale. Cette incertitude est liée à l'hétérogénéité des intensités dans la fenêtre [OKUTOMI92].

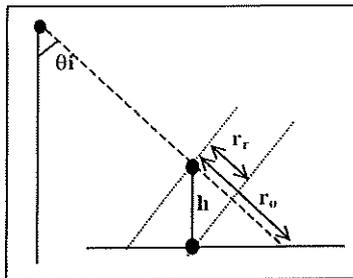
I.2. Extraction du 3-D en radar haute résolution

En haute résolution, l'extraction du 3-D vise à restituer les altitudes du sol et celles du bâti. Dans la littérature, les études en radar sur le sujet sont de deux types : monoscopiques et interférométriques. Nous présentons succinctement leur principe et les travaux existants.

I.2.1. Etudes monoscopiques

I.2.1.1. La mesure monoscopique des hauteurs

Sous hypothèse d'un sol localement plat, des relations géométriques simples existent entre la hauteur d'un objet à pente verticale ou oblique et la longueur de son ombre ou de son repliement [LAPRADE69] (figure 2-6). La mesure monoscopique permet d'avoir une estimation rapide de l'altitude relative par rapport au sol en faisant abstraction des problèmes d'appariement. Par contre, elle ne fournit pas d'information sur la localisation planimétrique.



$$\text{Par la mesure du repliement : } h = r_r / \cos \theta_i \quad \text{éq. 2-4}$$

$$\text{Par la mesure de l'ombre : } h = r_o \cdot \cos \theta_i \quad \text{éq. 2-5}$$

figure 2-6 : hauteur par mesure du repliement ou de l'ombre pour une structure verticale

I.2.1.2. Utilisation de la mesure monoscopique

Les méthodes automatiques utilisant cette technique sur du bâti sont récentes et peu nombreuses. De plus, elles s'appuient sur la mesure de la longueur des ombres.

Dans [KIRSCHT98], l'image est segmentée par un algorithme de classification basé sur des champs de Markov en trois classes. L'auteur fait l'hypothèse que la classe des pixels foncés correspond aux ombres, la classe intermédiaire au sol et la classe des pixels clairs aux objets élevés. Les erreurs de classification entre sol, arbre, route et ombre sont corrigées en étudiant l'ordre d'apparition des classes dans l'image ; cette étape n'est pas détaillée. A chaque objet élevé est associée une région ombre. La longueur de l'ombre est mesurée suivant l'axe des distances sur chaque ligne croisée par l'objet. La hauteur est calculée différemment pour des structures droites et pour des arbres, modélisés par une sphère élevée. L'algorithme est appliqué sur une scène de forêt, d'arbres isolés et avec quelques bâtiments. Visuellement, le résultat est intéressant mais n'est pas évalué quantitativement. De plus, certains bâtiments ont un toit foncé à cause de l'effet miroir ce qui induit probablement des erreurs liées à l'hypothèse émise sur le résultat de la classification.

Dans [BOLTER00a], un bâtiment est reconstruit à partir de quatre images acquises depuis les quatre côtés de la structure. Les hauteurs sont également mesurées à partir des ombres. Pour cela, l'image est classée par seuillage et opérations morphologiques. La classe ombre correspond à la région la plus foncée. Ligne par ligne et connaissant la direction de la visée, le pixel de début de l'ombre est marqué comme contour d'intérêt. La hauteur de ce point est mesurée d'après la longueur de l'ombre sur la ligne. Cette méthode permet de fournir l'empreinte du bâtiment avec des altitudes en chaque point du bord du toit donc sans faire d'hypothèse sur sa forme. Comparé avec l'interférogramme issu de quatre interférogrammes (voir section I.2.2), le résultat est beaucoup moins bruité.

Dans ces deux études, la longueur de l'ombre peut être mesurée car l'ombre est distincte du sol et du toit. Dans notre cas, délimiter les bords de l'ombre serait sur nos images en bande S impossible (cf.

Chapitre 1, II). Sur les images en bande X, les ombres pourraient être utilisées. Elles sont dans la région la plus foncée des images classifiées obtenues précédemment (cf. chapitre 1, figure 1-29). Cependant, la détermination précise de leur longueur se heurte à des difficultés liées à plusieurs facteurs :

- le bruit,
- la plupart des toits sont foncés et donc dans la même classe que l'ombre, ce qui rend ambiguë la recherche du début de l'ombre,
- des routes se retrouvent dans la région foncée ce qui peut fausser dans certains cas la mesure de la fin de l'ombre.

La présence des échos forts issus du bord des toits et des échos doubles nous permet d'envisager l'utilisation de la mesure monoscopique de la hauteur par le repliement (chapitre 4, section IV.2.3).

I.2.2. Etudes interférométriques

I.2.2.1. Notions générales sur l'interférométrie

L'interférométrie est basée sur l'étude de l'image des différences de phases, l'interférogramme, entre deux images stéréoscopiques à base étroite. La base ne doit pas dépasser une base critique au-delà de laquelle le décalage fréquentiel entre les deux signaux issus d'une même cellule de résolution induit une perte de cohérence. Tant que la cohérence est maintenue, la différence de phase est significative. Elle correspond alors à la différence de chemin parcouru par l'onde entre l'antenne et un point, ce qui permet de calculer son altitude connaissant les CPDV. Le calcul de l'interférogramme nécessite le recalage précis des deux signaux. Pour cela, leur superposition est obtenue par calcul des paramètres de la transformation, généralement une translation, d'une géométrie à l'autre, par exemple par corrélation.

Si le relief est tel que la différence de chemin est supérieure à la longueur d'onde, la différence de phase dépasse 2π . La phase étant mesurée modulo 2π , un saut de phase se produit et la différence repasse par 0. Une opération complexe du 'déroulement de phases' est nécessaire pour retrouver l'information complète. L'altitude de relief correspondante ou altitude d'ambiguïté dépend des conditions géométriques d'acquisition. Plus l'altitude d'ambiguïté augmente, plus le déroulement est 'facile' mais plus la précision de la mesure altimétrique diminue. En aérien, l'altitude du porteur et la base sont telles que l'altitude d'ambiguïté est en général grande. Le déroulement n'est parfois pas utile sur le bâti mais la précision de la mesure du 3-D est alors limitée.

Par ailleurs, des artefacts atmosphériques ont été mis en évidence, en particulier en satellitaire bi-passes (les deux images ne sont pas acquises simultanément). L'atmosphère standard produit un effet de pente sur le sol (retard de phase) qui peut être en partie corrigé, tandis que des effets moins prévisibles dus aux turbulences atmosphériques en particulier les nuages, restent limitatifs [TARAYRE96]. Il est donc préférable que les images soient acquises simultanément.

Selon l'altitude d'ambiguïté, l'interférométrie peut aboutir à des mesures de haute précision et l'interférométrie différentielle (à partir d'un interférogramme et d'un MNT ou de deux interférogrammes ou d'un interférogramme et d'une image supplémentaire) permet de mesurer un mouvement de terrain avec une précision centimétrique ([MASSONNE93], [ZEBKER94]).

I.2.2.2. Utilisation de l'interférométrie en haute résolution

La littérature fait état d'études sur images aériennes dont la résolution varie entre quelques mètres et quelques dizaines de centimètres : TOPSAR, STAR-3i, SANDIA, AES, AER, DOSAR. Généralement, les images d'amplitude et les interférogrammes font apparaître des toits texturés. Malgré cela, deux limitations empêchent de produire directement le MNE : le bruit de l'interférogramme [BOLTER00a] et les effets de repliement. Le repliement se traduit sur l'interférogramme par une zone d'altitude décroissante entre celle du toit et celle du sol [BURKHART96]. G.R. Burkhart et al. constatent que l'interférogramme est moins ambigu lorsque la zone de repliement est supprimée, ce qui est possible connaissant une estimation de la hauteur et l'incidence.

Les travaux se sont alors orientés vers des algorithmes en deux étapes :

- la segmentation entre bâtiments, sol et zone de repliement,
- l'attribution d'une altitude ou d'un modèle d'altitude par bâtiment.

La segmentation est soit manuelle [MERCER98], soit automatique. Dans ce cas, elle est réalisée sur l'image des intensités [SORGEL00] ou sur l'interférogramme :

- recherche de plans horizontaux [GAMBA99],
- détection du contour entre toit et ombre puis croissance de région pour délimiter les autres bords [HOEPFNER99]. La sélection d'un contour passe par l'analyse locale des altitudes. Un contour toit/ombre est conservé s'il est possible de trouver en avant de ce contour une altitude plus haute que celle lue au-delà de l'ombre. Pour les autres contours sur le bord du toit, deux altitudes doivent être observées : celle du sol et celle du toit. Les résultats obtenus sont intéressants même si les bâtiments dont l'ombre se termine sur un autre toit ne sont pas détectés, ainsi que les bâtiments à l'ombre trop petite ou au toit trop étroit.

Dans l'empreinte du bâtiment, plusieurs altitudes sont lues sur l'interférogramme du fait de l'imprécision de la segmentation, du bruit et du repliement. Dans [BICKEL97], D.L. Bickel et al. précisent que théoriquement, l'altitude lue est celle du sol si sa rétrodiffusion est plus forte que celle du bâtiment, l'altitude du bâtiment sinon et une altitude intermédiaire si les deux rétrodiffusions sont similaires. Par contre, la cohérence, fournie avec l'interférogramme, diminue si plusieurs types de diffuseurs participent au même pixel. D.L. Bickel et al. gardent donc l'altitude maximale si la cohérence est suffisante. L'altitude maximale est aussi sélectionnée dans [MERCER98].

Pour supprimer la zone de repliement, la fusion de deux interférogrammes pris sous des visées opposées est proposée dans [BICKEL97]. Le repliement n'a pas lieu sur le même côté du bâtiment et un MNE corrigé est obtenu en gardant l'altitude de cohérence maximale. Cette méthode est reprise dans [BOLTER00b] où quatre interférogrammes pris sous les quatre angles de vue de la scène sont fusionnés. La fusion consiste à garder en chaque pixel l'altitude maximale. Il en résulte un interférogramme moins bruité, avec des toits élargis par les zones de repliement et sans ombre. Un masque binaire est calculé entre sol et structures élevées. Pour cela, l'altitude minimale sur un voisinage assez grand est attribuée en chaque point. Ce nouveau MNE est celui du sol et par différence on obtient l'empreinte des structures élevées. La classification bâtiments/végétation est ensuite effectuée par analyse de la cohérence de l'altitude dans chaque région élevée : pour un arbre, cette cohérence est faible tandis que la variance des altitudes est faible comparée à celle d'un toit à plusieurs pentes. Sur chaque région restante, une forme rectangulaire puis un modèle de toit plat ou pentu à deux pentes sont plaqués. Le résultat montre une interprétation correcte de la scène avec des erreurs

altimétriques de l'ordre du mètre. Dans [GAMBA01], l'interférogramme est accompagné d'images hyperspectrales : les résultats de la classification sur l'image radar et sur les données hyperspectrales sont fusionnés selon un ET logique. Cette fusion permet de supprimer les régions élevées dans l'interférogramme correspondant à la végétation ou aux zones de repliement et de fournir un modèle 3-D sur les bâtiments plus précis.

Dans [PETIT01b], D. Petit et al. proposent une méthode pour détecter les zones de repliement. Le décalage fréquentiel entre les deux signaux est exploité pour produire des interférogrammes et des images de cohérence, dits 'de pente'. Ils correspondent chacun à la réponse associée à une pente donnée et permettent ainsi de détecter les pixels résultant de la contribution de pentes verticales et horizontales.

Contrairement aux études précédentes, M. Quartulli et al. [QUARTULL01] abordent le problème des scènes contenant des maisons. Ces dernières sont entourées d'arbres pouvant être plus hauts que leur toit. Une méthode hiérarchique est envisagée. Elle inclut la connaissance déterministe des phénomènes visibles possibles (ombres, rebonds multiples et réflexions spéculaires, valeurs du coefficient de rétrodiffusion sur les surfaces urbaines et les arbres) et des algorithmes probabilistes : classification de chaque source d'information (phase, gradients de phase, intensité, cohérence) et fusion des résultats aboutissant à un masque sur les toits.

L'interférométrie offre plusieurs avantages par rapport à la radargrammétrie :

- on s'affranchit du problème de la mise en correspondance. En effet, en haute résolution, la base est généralement faible et le calcul de l'interférogramme est plus aisé,
- plusieurs images apportent des informations pertinentes : l'interférogramme, l'image des intensités et l'image des cohérences.

On constate cependant qu'en présence d'échos doubles et en l'absence de texture sur les toits, les deux techniques sont confrontées à des difficultés comparables : restituer l'empreinte du bâtiment et lui attribuer une altitude ou un modèle d'altitude.

1.2.3. Autres techniques

Précisons qu'il existe deux autres techniques d'extraction 3-D en imagerie radar : la radarclinométrie et la polarimétrie. Plus de détails pourront être trouvés dans [TOUTIN00].

La **radarclinométrie** calcule l'orientation locale de la surface correspondante à chaque pixel à partir d'une modélisation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence. La technique consiste à intégrer ensuite de proche en proche les orientations obtenues pour fournir les altitudes relativement à un point de référence. Cependant, le modèle de rétrodiffusion fournit une équation alors que la surface est décrite par deux angles (en azimut et en distance). Des techniques pour lever l'ambiguïté ont été développées. La modélisation de la rétrodiffusion utilisée est basée sur l'hypothèse de surface lambertienne qui s'applique pour des régions homogènes. En haute résolution où les réflexions spéculaires sont nombreuses, cette technique n'est pas utilisée.

La **polarimétrie** fournit une information sur la pente du terrain par analyse d'images polarisées. Un point de référence est également nécessaire pour avoir une mesure absolue. Son utilisation dans les applications cartographiques est encore restreinte.

II. Mesure du potentiel stéréoscopique en radar

L'objectif de cette section est de mesurer le potentiel géométrique de nos données en stéréoscopie. Pour cela, nous voulons connaître l'erreur de localisation induite par une erreur sur les mesures des CPDV et une erreur de mise en correspondance. En effet, les erreurs d'estimation des disparités en automatique sont de l'ordre de 1-2 pixels d'après [LEBERL94]. L'impact de ces erreurs sur la localisation doit être compatible avec la précision altimétrique souhaitée sous peine de ne pas pouvoir discriminer le sursol du sol. Ainsi, après avoir rappelé les critères utilisés pour estimer le pouvoir stéréoscopique d'une configuration, un modèle d'erreurs théorique est proposé. Nous l'appliquons au cas particulier de trajectoires parallèles et Doppler nul puis différentes configurations sont comparées, suivant les angles stéréoscopiques (différence entre les deux angles d'incidence) et les angles de croisement entre les deux trajectoires.

II.1. Mesure de potentialité dans la littérature

Une configuration a un bon potentiel stéréoscopique si elle permet de définir des disparités suffisamment significatives entre les deux images du couple pour aboutir à une information topographique précise. Dans la littérature, plusieurs critères sont retenus pour évaluer une configuration :

- L'arrangement stéréoscopique : visées de même côté ou de côtés opposés [LAPRADE63]. On préfère les visées de même côté car les dissimilarités sont limitées ce qui simplifie la mise en correspondance. Des simulations ont montré que dans le cas de trajectoires croisées, l'angle de croisement ne doit pas dépasser 40° pour retrouver les ressemblances entre les deux images [KOBRIK86]. G.H. Rosenfield [ROSENFIE68] montre que la configuration optimale est celle où les capteurs sont à la même altitude de part et d'autre de la scène avec un angle droit entre les deux visées. Ainsi, dans [FULLERTO86], une correction radiométrique est mise en œuvre dans le cas de visées opposées avant mise en correspondance. Elle consiste à découper l'histogramme en trois zones. Les zones claires et sombres sont inversées contrairement à la zone intermédiaire.
- L'angle stéréoscopique. L'information topographique extraite est d'autant plus précise que cet angle est grand. Ceci est en conflit avec la première condition. F. Leberl et al. [LEBERL85] concluent que même pour un écart de 60° , le couple d'images acquises avec des visées non opposées reste opportun. Pour faire le lien avec l'optique, certains auteurs utilisent le facteur d'exagération ou le rapport B/H, Base sur Hauteur. S. Sylvander et al. [SYLVANDE98b] montrent qu'un B/H de 0.3 permet d'obtenir une erreur altimétrique de l'ordre de la taille du pixel. Le facteur d'exagération [LEBERL79] se calcule par le rapport entre disparité et hauteur et s'exprime en fonction de l'écart angulaire et des angles d'incidence. Plus il est grand, plus la disparité observée est grande. Il augmente plus vite qu'en optique, c'est-à-dire que le radar a des potentialités stéréoscopiques dès les faibles angles d'intersection (moins de 5°).

- Les angles d'incidence. les erreurs sur l'altitude augmentent lorsque l'angle d'incidence augmente [RAMAPRYI86]. Cependant, pour un angle de visée inférieur à 10°, on a des problèmes de repliement et au-delà de 80°, des problèmes d'ombres [LEBERL85].

L'arrangement doit donc répondre au compromis entre pouvoir stéréoscopique, dissimilarités radiométriques et géométriques entre les deux images et limitation des parties cachées. Pour évaluer quantitativement la configuration stéréoscopique, nous nous intéressons aux erreurs de localisation dues aux erreurs de mesures des paramètres (position et vitesse du capteur, distance antenne-cible) et dues aux erreurs de mise en correspondance (disparités en colonne et en ligne des points homologues). De telles mesures ont déjà été réalisées par le biais de pointés manuels sur des images décimétriques ([RAGGAM98], [SYLVANDE98b], [TOUTIN97]) et des modèles théoriques dans des cas particuliers (cas trajectoires parallèles, Doppler nul, même altitudes gauche et droite, etc, [LEBERL79], [LEBERL90], [CHEN96], [KOBRIK86]). Un modèle d'erreur théorique plus général est ici proposé, valable pour toute configuration.

II.2. Modélisation des erreurs de localisation

II.2.1. Méthode

Nous cherchons d'abord à estimer les erreurs de localisation en fonction des incertitudes sur les mesures : position et vitesse des deux antennes et distances antenne-cible. Nous calculons pour cela la variance de l'estimateur des moindres carrés non linéaires. L'estimateur des moindres carrés non linéaires ne donne pas la variable en fonction des mesures explicitement. Seule une fonction implicite de la variable et des mesures est connue. La méthode rappelée dans [FESSLER95] nous permet dans ce cas d'exprimer la matrice de covariance de la variable à estimer, en fonction de la matrice de covariance des mesures et de la fonction à minimiser.

La variable à estimer est le point P (voir I.1.1.2.1 pour les notations) : $X(x_1, x_2, x_3)^T$

Le vecteur des mesures, $Y = (y_i)_{i \in \{1,14\}}$, s'écrit : $Y = (s_1^{x1}, s_1^{x2}, s_1^{x3}, v_1^{x1}, v_1^{x2}, v_1^{x3}, s_2^{x1}, s_2^{x2}, s_2^{x3}, v_2^{x1}, v_2^{x2}, v_2^{x3}, r_1, r_2)^T$

La fonction de X et Y minimisée par l'algorithme des moindres carrés s'écrit (cf. équations 2-2 et 2-3) :

$$\Phi(X, Y) = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{(S_i P^2 - r_i^2)^2}{\sigma_{\#}^2} + \frac{(\overline{S_i P \cdot \vec{V}_i} - r_i g_i)^2}{\sigma_{\beta}^2} \right] \text{ avec } g_i = \frac{f_{Di} \lambda_i}{2}, i \in [1, 2]$$

Ceci signifie que l'estimée \tilde{X} recherchée satisfait les équations, pour $1 \leq i \leq 3$:

$$\frac{\partial \Phi(X, Y)}{\partial x_i} = 0$$

D'après le théorème des fonctions implicites, si la dérivée de Φ en X est dérivable en X et en Y et si la dérivée seconde en X est inversible, il existe une fonction f telle que localement :

$$\tilde{X} = f(Y)$$

On montre alors que :

$$\text{cov}(\tilde{X}) = \nabla f(Y)^T \Gamma_Y \nabla f(Y) \text{ où } \Gamma_Y \text{ est la matrice de covariance des mesures}$$

Les calculs dans [FESSLER95] conduisent à :

$$\nabla f(Y) = (\nabla^1 \Phi(X^*, Y))^T (\nabla^2 \Phi(X^*, Y))^{-1}$$

avec :

$\nabla^1 \Phi(X, Y)$ est la matrice des dérivées partielles $\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_i \partial y_j}(X, Y) \right)_{i \in \{1,3\}, j \in \{1,4\}}$

$\nabla^2 \Phi(X, Y)$ est la matrice des dérivées partielles $\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_j}(X, Y) \right)_{i \in \{1,3\}, j \in \{1,3\}}$

X^* représente le point qui aurait été obtenu sans erreur de mesures.

La matrice de covariance de la variable à estimer indique l'impact des erreurs de mesures sur la localisation. L'effet des erreurs de mise en correspondance est ensuite déduit sachant que ces erreurs induisent des erreurs de date (donc de position et de vitesse du capteur) et des erreurs de distance.

II.2.2. Modèle d'erreurs des paramètres

On montre que la matrice de covariance de la variable estimée peut se mettre sous la forme de produits vectoriels et de produits scalaires combinant vecteurs position et vecteurs vitesse. Nous supposons les mesures gauche et droite indépendantes, ce qui est raisonnable puisque les mesures sont effectuées lors de passes distinctes. La mesure de distance est aussi supposée indépendante des mesures de position et vitesse. Ceci n'est pas rigoureusement vrai car la mesure du déphasage fournissant la distance dépend du bon recalage de la trajectoire avec l'image. Sous ces deux hypothèses, nous obtenons :

pour $i, j \in \{1,3\}^2$,

$$\begin{aligned} \text{cov}(x_i, x_j) = & \frac{1}{D^2} \sum_{k=1}^2 \sum_{p=1}^3 \left[(\overrightarrow{F_{sk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{xi}}) (\overrightarrow{F_{sk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{sj}}) \sigma_{s_k}^2 + (\overrightarrow{F_{vk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{xi}}) (\overrightarrow{F_{vk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{sj}}) \sigma_{v_k}^2 \right] \\ & + \frac{1}{D^2} \sum_{k=1}^2 (\overrightarrow{F_{rk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{xi}}) (\overrightarrow{F_{rk}(x_p)} \cdot \overrightarrow{u_{sj}}) \sigma_{r_k}^2 + \frac{1}{D^2} \sum_{k=1}^2 \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 K_{p,q,i,j} \sigma_{s_k^{sp}, v_k^{sq}}^2 \end{aligned} \quad \text{éq. 2-6}$$

où

- D est le déterminant de la matrice $\nabla^2 \Phi(X^*, Y)$,
- les fonctions vectorielles $\overrightarrow{F_{sk}(x_p)}$ (respectivement $\overrightarrow{F_{vk}(x_p)}$ et $\overrightarrow{F_{rk}(x_p)}$) définissent la relation de dépendance entre P et la position suivant l'axe $\overrightarrow{u_{sp}}$ de l'antenne k (respectivement la vitesse suivant l'axe $\overrightarrow{u_{sp}}$ de l'antenne k et la distance cible-antenne k). Ces fonctions vectorielles s'expriment par :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F_{sk}(x_p)} &= \frac{v_k^{sp}}{\sigma_{r_k}^2} (\overrightarrow{T_k} + \overrightarrow{N_k}) + \frac{x_p - s_k^{sp}}{\sigma_{dk}^2} (\overrightarrow{U_k} + \overrightarrow{M_k}) \\ \overrightarrow{F_{vk}(x_p)} &= -\frac{x_p - s_k^{sp}}{\sigma_{dk}^2} (\overrightarrow{T_k} + \overrightarrow{N_k}) \end{aligned}$$

$$\vec{F}_{rk} = \frac{g_k}{\sigma_{rk}^2} (\vec{T}_k + \vec{N}_k) + \frac{r_k}{\sigma_{rk}^2} (\vec{U}_k + \vec{M}_k)$$

avec :

$$\begin{aligned} \vec{T}_k &= \frac{4}{\sigma_{d1}^2 \sigma_{d2}^2} (\vec{S}_1 \vec{P} \wedge \vec{S}_2 \vec{P}) (\vec{V}_k \cdot (\vec{S}_1 \vec{P} \wedge \vec{S}_2 \vec{P})) & \vec{M}_k &= \sum_{l=1}^2 \left[\frac{4}{\sigma_{\beta l}^2 \sigma_{dl}^2} (\vec{V}_l \wedge \vec{S}_l \vec{P}) (\vec{S}_k \vec{P} \cdot (\vec{V}_l \wedge \vec{S}_l \vec{P})) \right], t \neq k \\ \vec{U}_k &= \frac{1}{\sigma_{f1}^2 \sigma_{f2}^2} (\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2) (\vec{S}_k \vec{P} \cdot (\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2)) & \vec{N}_k &= \sum_{l=1}^2 \left[\frac{1}{\sigma_{\beta l}^2 \sigma_{dl}^2} (\vec{V}_l \wedge \vec{S}_l \vec{P}) (\vec{V}_k \cdot (\vec{V}_l \wedge \vec{S}_l \vec{P})) \right], t \neq k \end{aligned}$$

On note dans la suite : $ds_k^{sp} = \vec{F}_{sk}(x_p) \cdot \vec{u}_{xi}$, $dv_k^{sp} = \vec{F}_{vk}(x_p) \cdot \vec{u}_{xi}$ et $dr_k = \vec{F}_{rk} \cdot \vec{u}_{xi}$

On montre que : $D = F_{s1}(x_1) \cdot \vec{u}_{x1} + F_{s2}(x_1) \cdot \vec{u}_{x1}$. Le terme relatif aux covariances des paramètres s'écrit :

$$K_{p,q,i,j} = (F_{sk}(x_p) \cdot \vec{u}_{xi}) (F_{vk}(x_q) \cdot \vec{u}_{xj}) + (F_{sk}(x_p) \cdot \vec{u}_{xj}) (F_{vk}(x_q) \cdot \vec{u}_{xi})$$

II.2.3. Modèle d'erreurs de mise en correspondance

Les erreurs de mise en correspondance incluent les erreurs de ligne et de colonne des points associés. Les erreurs de colonne se répercutent par des erreurs de distance selon (cf. chapitre 1, éq.1-9) :

$$\sigma_j = \sigma_r / TD$$

Au premier ordre, on suppose que les erreurs de ligne ne génèrent que des erreurs sur la position du capteur, bien qu'elles produisent également des erreurs sur la vitesse. Dans le cas de RAMSES, l'écart-type de la vitesse est environ 0.5% de sa moyenne le long de la trajectoire, ce qui est en effet très faible. Selon l'équation 1-8 :

$$\sigma_i = \frac{PRF}{V S_0 S} [(s^{i1} - s_0^{i1}) \sigma_{s,i} + (s^{i2} - s_0^{i2}) \sigma_{s,i} + (s^{i3} - s_0^{i3}) \sigma_{s,i}]$$

De plus, lorsqu'on se place dans le référentiel gauche $(N_1, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, nous considérons que les erreurs de ligne induisent des erreurs de position uniquement suivant l'axe de la trajectoire (axe \vec{x}_1), c'est-à-dire que l'on néglige les irrégularités de trajectoires.

II.3. Interprétation du modèle d'erreurs

Ce modèle sous sa forme générale est difficile à interpréter. On constate cependant qu'il dépend :

- de l'écart angulaire entre les deux visées par le biais de $(\vec{S}_1 \vec{P} \wedge \vec{S}_2 \vec{P})$
- de l'angle d'intersection des deux trajectoires par $(\vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2)$
- de l'angle Doppler par le biais des $(\vec{V}_k \wedge \vec{S}_l \vec{P})$.

Il se simplifie donc fortement dans le cas de trajectoires parallèles et d'angles Doppler nuls, cas exposé dans [LEBERL90].

II.3.1. Rappel du cas de trajectoires parallèles et d'angles Doppler nuls

II.3.1.1. Impact des erreurs de paramètres

Le tableau 2-1 résume les erreurs sur l'estimation des coordonnées géographiques en fonction des erreurs sur les mesures, exprimées dans le référentiel gauche.

	ds_1^{x1}	ds_1^{y1}	ds_1^{z1}	dv_1^{x1}	dv_1^{y1}	dv_1^{z1}	dr_1
dx_1 (le long de la trajectoire)	$\frac{U_1^2}{U_1^2 + U_2^2}$	0	0	0	$\frac{r_1 \sin \theta_1 U_1}{U_1^2 + U_2^2}$	$\frac{r_1 \cos \theta_1 U_1}{U_1^2 + U_2^2}$	0
dy_1 (perpendiculaire à la trajectoire)	0	$\frac{\sin \theta_1 \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$	$\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$	0	0	0	$\frac{\cos \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$
dz_1	0	$-\frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$	$-\frac{\cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$	0	0	0	$\frac{-\sin \theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$

tableau 2-1 : erreurs sur les coordonnées estimées en fonction des erreurs de mesures gauches, cas trajectoires parallèles, angles Doppler nuls, visées de même côté. Expressions en fonction des angles d'incidence gauche et droit, θ_1 et θ_2 , et de $U_1 = V_1 / \sigma_1$ et $U_2 = V_2 / \sigma_2$. Dans le cas de visées opposées, l'écart stéréoscopique s'écrit $\Delta\theta = \theta_1 + \theta_2$. Les coefficients relatifs aux erreurs droites se déduisent par symétrie.

La première remarque est que les erreurs de coordonnées suivant la trajectoire (axe x_1) sont indépendantes des erreurs de coordonnées perpendiculairement à la trajectoire (suivant y_1 et z_1). Ainsi, les erreurs sur y_1 et z_1 dépendent des mesures dans le plan d'acquisition, c'est-à-dire des mesures d'angle d'incidence et de distance antenne-cible (soit $s_1^{y1}, s_1^{z1}, s_2^{y1}, s_2^{z1}, r_1, r_2$) (figure 2-7).

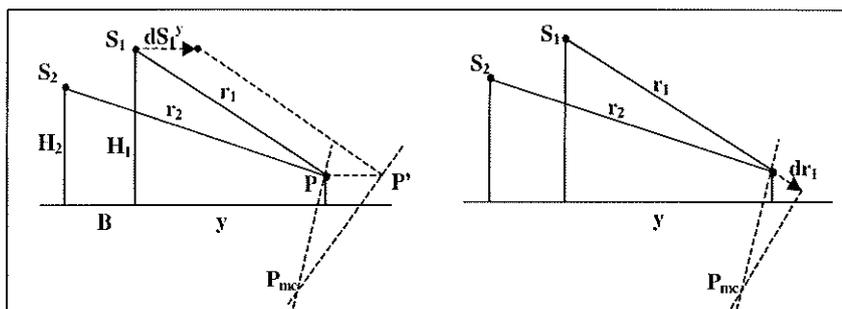


figure 2-7 : impact d'une erreur de position dans le plan d'acquisition et d'une erreur de distance sur la localisation. P_{mc} = Point trouvé par les moindres carrés

Les erreurs d'estimation du point P sur x_1 sont dues aux erreurs qui influent sur l'angle Doppler (soit sur $s_1^{x1}, v_1^{x1}, v_1^{z1}, s_2^{x1}, v_2^{x1}, v_2^{z1}$). Dans ce cas, on constate que les deux cercles distance-Doppler ne se croisent plus et l'estimateur converge vers le point à mi-chemin entre les deux cercles (figure 2-8).

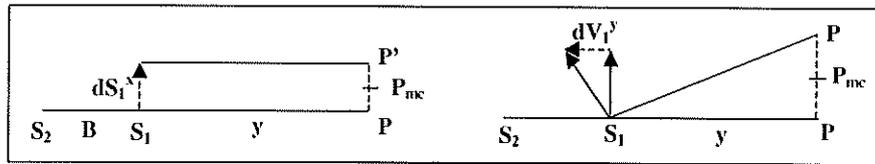


figure 2-8 : impact des erreurs équivalentes à l'introduction d'un angle Doppler sur la localisation.

P_{mc} = Point trouvé par les moindres carrés

Le vecteur vitesse instantané étant orthogonal au plan d'acquisition, les erreurs sur sa composante en x_I n'ont pas d'impact.

Certains coefficients sont égaux au signe près, du fait de symétries qui peuvent être mises en évidence géométriquement :

- les erreurs de mesures sur s_1^{z1}, s_2^{z1} ont le même effet sur la composante y_I de P ,
- les erreurs sur s_1^{y1}, s_2^{y1} ont le même impact sur la composante z_I du point P ,
- si $\theta_2 = 90 - \theta_1$, l'effet des erreurs de s_1^{z1}, s_2^{z1} sur y_I est égal à l'effet des erreurs de s_1^{y1}, s_2^{y1} sur z_I .

II.3.1.2. Impact des erreurs de mise en correspondance

On s'intéresse à l'effet d'une erreur de disparité de 1 pixel sur la localisation au sol. Cette erreur est exprimée en mètre ou en pixel (taille du pixel radar, TD). Plusieurs approches d'analyse étant possibles, nous adoptons celle-ci : pour un couple de points homologues, on suppose que l'erreur de disparité est une erreur moyenne entre le pointé à gauche et le pointé à droite. En distance (même raisonnement en azimuth), la disparité s'écrit : $d_j = j_2 - j_1$. Les coordonnées image gauches et droites étant indépendantes, on a : $\sigma_{dj}^2 = \sigma_{j1}^2 + \sigma_{j2}^2$. A autres mesures constantes, l'impact des erreurs de distances sur la coordonnée x_p de P est isolé et s'exprime par (cf. éq. 2-6) :

$$\sigma_{sp}^2 = k_1^2 \sigma_{j1}^2 + k_2^2 \sigma_{j2}^2, \text{ avec } k_1, k_2 \text{ les coefficients d'erreur du modèle précédent}$$

D'où :

$$\sigma_{sp}^2 = \frac{k_1^2 + k_2^2}{2} \sigma_{dj}^2 + \frac{k_1^2 - k_2^2}{2} \sigma_{j1}^2 - \frac{k_1^2 - k_2^2}{2} \sigma_{j2}^2$$

soit l'impact de l'erreur de disparité donné par : $|dx_p| = \sqrt{\frac{k_1^2 + k_2^2}{2}} |dd_j|$

L'erreur de 1 ligne induit une erreur moyenne planimétrique en mètres de :

$$\left| \frac{dx_1}{dd_i} \right| = \frac{\sqrt{1/2}}{U_1^2 + U_2^2} \sqrt{\left(\frac{U_1^3}{\sigma_{f1} PRF_1} \right)^2 + \left(\frac{U_2^3}{\sigma_{f2} PRF_2} \right)^2}$$

A vitesses proches et même PRF, on a : $\left| \frac{dx_1}{dd_i} \right| \approx \frac{V}{2 \cdot PRF}$

En faisant l'approximation $PRF \approx V / R_a$, avec R_a la résolution azimuthale, le rapport devient :

$R_a / 2$	en mètre,
$R_a / 2 \cdot TD$	en pixel radar

Cette erreur est donc de l'ordre de la moitié de la résolution azimutale.

L'erreur de 1 colonne induit des erreurs altimétrique et planimétrique qui s'expriment en mètres par :

$$\left| \frac{dz_1}{dd_j} \right| = \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{TD_2^2 \sin^2 \theta_1 + TD_1^2 \sin^2 \theta_2}}{\sin|\Delta\theta|} \quad \text{et} \quad \left| \frac{dy_1}{dd_j} \right| = \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{TD_2^2 \cos^2 \theta_1 + TD_1^2 \cos^2 \theta_2}}{\sin|\Delta\theta|}$$

Les erreurs diminuent avec l'angle stéréo. L'erreur altimétrique augmente avec l'angle d'incidence alors que l'erreur planimétrique diminue. L'erreur de localisation globale vaut donc ($TD=TD_1=TD_2$) :

$TD/\sin \Delta\theta $	en mètre,
$1/\sin \Delta\theta $	en pixel radar

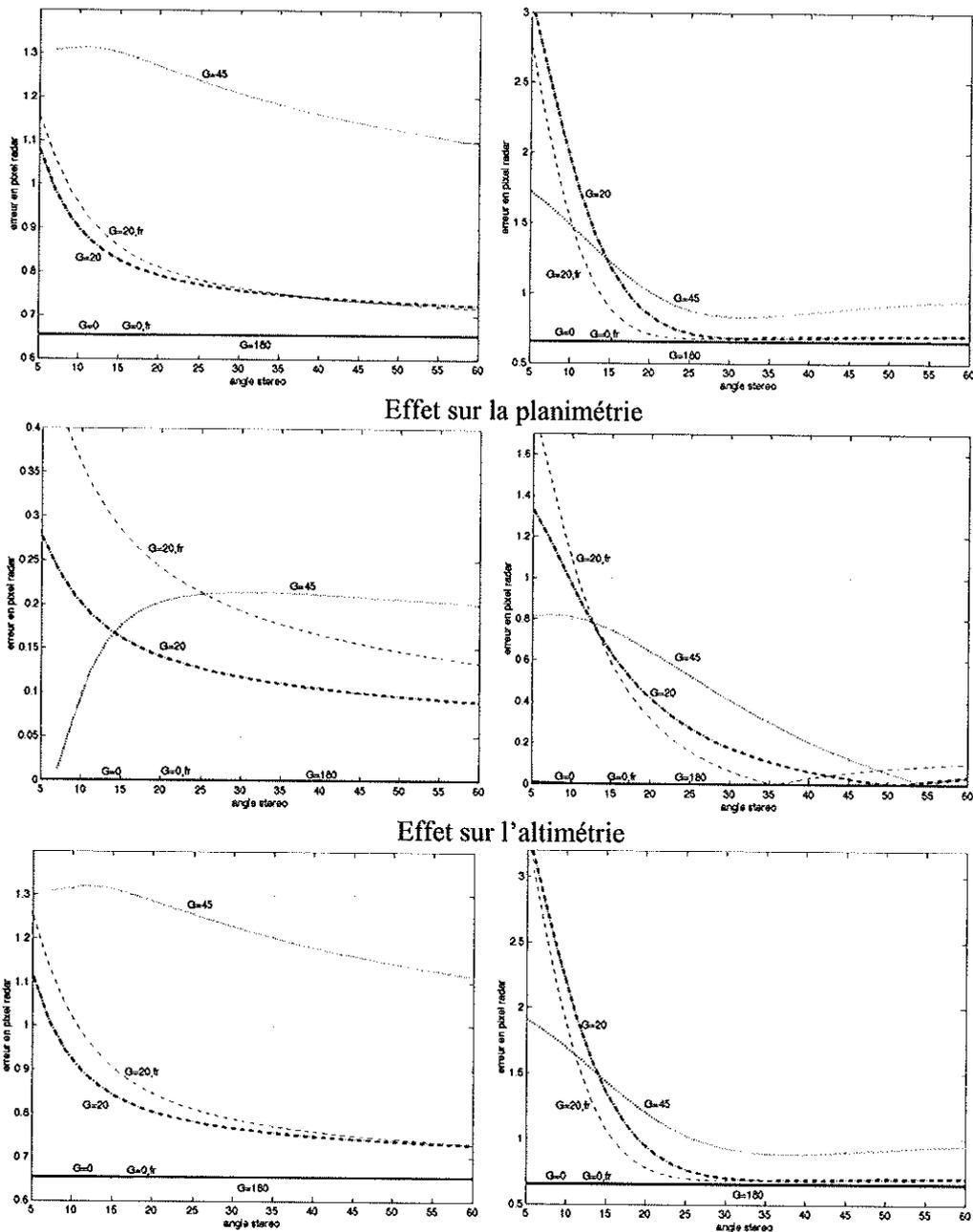
On constate qu'il est impossible d'avoir une erreur de localisation globale inférieure à la taille du pixel dans l'image radar. L'erreur minimale vaut 1 pixel radar pour $|\Delta\theta| = \pi/2$ [2π]. En visées de même côté, cette condition ne peut pas être atteinte. En visées opposées, on retrouve la configuration optimale décrite dans [ROSENFIE68] (cf. section II.1).

II.3.2. Influence des angles stéréo et d'intersection - validation du modèle

Grâce à ce modèle, nous pouvons analyser l'influence des angles stéréoscopiques et des angles de croisement des deux trajectoires. Cette étude nous permet de vérifier que le modèle aboutit aux mêmes conclusions que celles déjà connues et de voir s'il apparaît d'autres éléments intéressants. L'analyse est basée sur des trajectoires simulées. A partir d'une trajectoire réelle, une trajectoire initiale rectiligne uniforme à altitude constante et Doppler nul est construite. Les autres trajectoires sont générées de telle sorte qu'elles définissent un angle stéréo $\Delta\theta$ entre 5 et 60° et un angle d'intersection G de 0, 20, 45 et 180°. La trajectoire initiale correspond à l'angle d'incidence le plus petit. La méthode de construction des trajectoires à partir de la trajectoire initiale est décrite dans l'annexe E.

II.3.2.1. Courbes d'erreurs

Les erreurs de disparités sont liées aux erreurs de coordonnées image, elles-mêmes liées aux erreurs de distances, positions et vitesses. Nous étudions donc uniquement les effets des erreurs de disparité sur la localisation en altimétrie, en planimétrie et globale. Les coefficients sont exprimés en pixel radar. Le modèle nous permet aussi d'étudier l'influence des coefficients de normalisation du système (figure 2-9 et figure 2-10).



Effet sur la localisation globale
 figure 2-9 : erreurs de localisation en pixel radar dues à l'erreur de disparité de 1 ligne selon $\Delta\theta$ (angle stéréoscopique) ; θ_1 (angle d'incidence gauche) de 20° et 30° (fr) et de G (angle de croisement des trajectoires) de 0° (-), 20° (-.), 45° (:), 180° (-.). A gauche : pas de normalisation du système d'intersection 3-D. A droite : avec normalisation

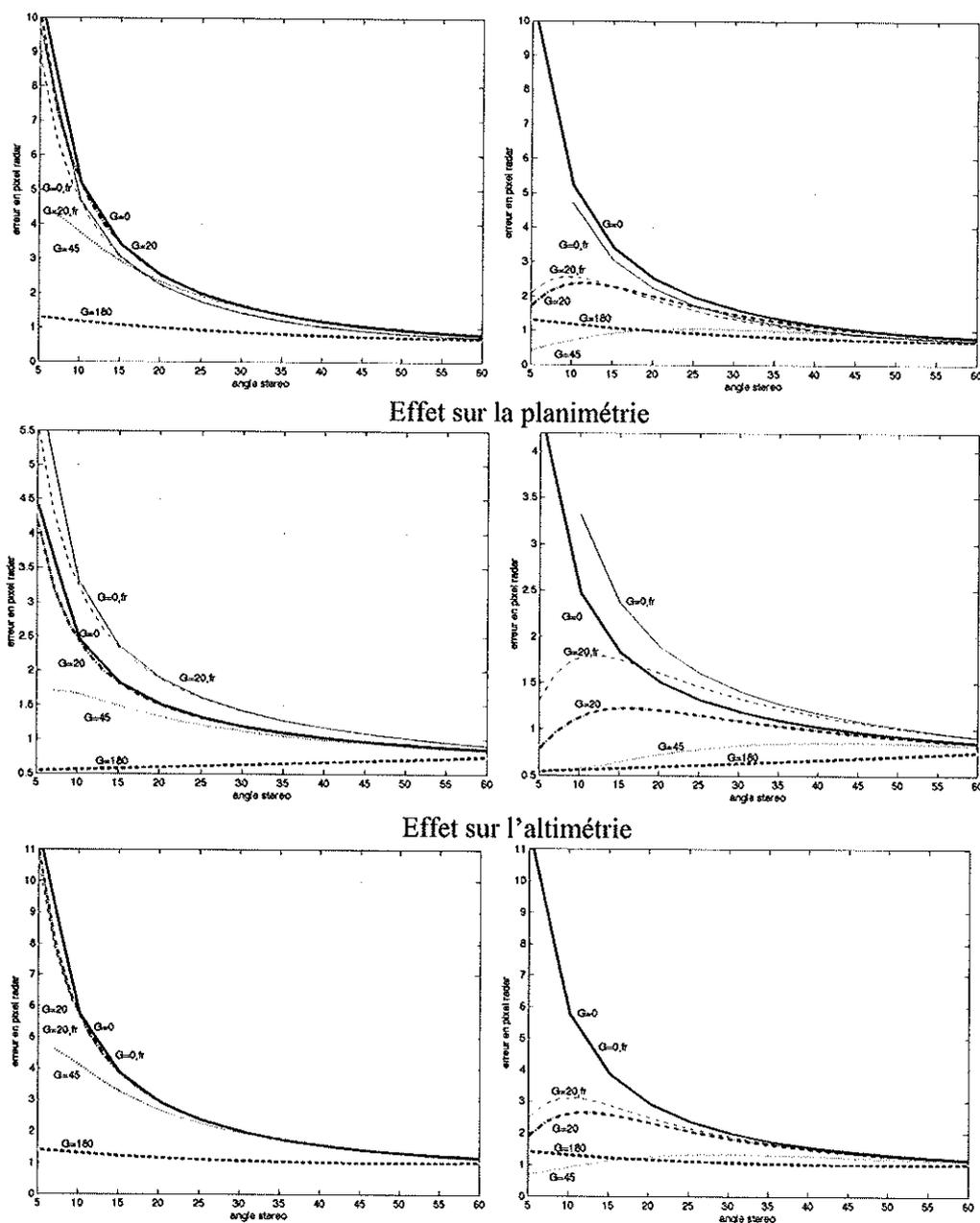


figure 2-10 : erreurs de localisation en pixel radar dues à l'erreur de disparité de 1 colonne selon $\Delta\theta$ (angle stéréoscopique) ; θ_l (angle d'incidence gauche) de 20° et 30° (fr) et de G (angle de croisement des trajectoires) de 0° (-), 20° (-), 45° (:), 180° (--). A gauche : pas de normalisation du système d'intersection 3-D. A droite : avec normalisation

II.3.2.2. Principales conclusions

On observe sur la figure 2-9 et la figure 2-10 à la fois des éléments connus et des constations nouvelles qui sont par ailleurs généralement intuitives :

- les erreurs de localisation diminuent globalement avec l'angle stéréoscopique,
- les erreurs en altimétrie augmentent avec l'angle d'incidence gauche, inversement en planimétrie pour des erreurs de colonne,

- l'effet des erreurs de lignes augmente avec l'angle d'intersection tandis que l'effet des erreurs de colonnes diminue,
- les erreurs de lignes sont négligeables devant les erreurs de colonnes à faible angle d'intersection ou à fort angle stéréoscopique,
- l'erreur de localisation reste supérieure à la taille du pixel radar (erreur supérieure à 1),
- la normalisation n'a pas d'influence pour des trajectoires parallèles. Dans les autres cas, les erreurs dues à l'erreur de disparité en colonne sont fortement réduites à faible angle stéréoscopique puis tendent vers le cas non normalisé lorsque cet angle augmente. En ligne, les erreurs sont par contre plus importantes avec la normalisation à faible angle stéréoscopique. Ce phénomène est intuitivement prévisible puisque la normalisation a pour effet d'équilibrer l'influence des mesures image en ligne et en colonne sur le calcul 3-D.

L'étude des termes de covariances pourra être menée en complément pour étudier le degré de relations entre les erreurs en altimétrie et en planimétrie selon les erreurs de positions et vitesses du capteur.

II.4. Comparaison des mesures monoculaires et stéréoscopiques

On souhaite comparer la mesure monoscopique de la hauteur avec la mesure stéréoscopique, dans le cas simple de trajectoires parallèles et d'angles Doppler nuls. Dans le cas stéréoscopique, la précision en pixel radar sur la localisation est de (cf. section II.3.1.2) :

$$E_{stereo} = \frac{1}{\sin|\theta_1 \pm \theta_2|}, \text{ signe '+' dans le cas de visées opposées}$$

Dans le cas monoscopique, on suppose que la localisation planimétrique est déjà connue. La hauteur est mesurée par la longueur du repliement ou de l'ombre.

II.4.1. Mesure par l'ombre

L'erreur en pixel radar de 1 pixel sur la mesure de l'ombre, effectuée sur l'image gauche, induit une erreur sur la hauteur de (figure 2-6) :

$$E_{mono} = \frac{dh}{dr_1} = \cos \theta_1$$

Cette erreur est subpixelique donc toujours inférieure à l'erreur de localisation stéréoscopique. Dans notre étude, nous avons cependant déjà vu dans le paragraphe I.2.1.2 que l'utilisation des ombres est problématique mais pourra être envisagée suivant les données et les sites imagés.

II.4.2. Mesure par le repliement

Si on réalise la mesure monoculaire du repliement sur l'image gauche, l'erreur en pixel radar sur l'altimétrie s'écrit (figure 2-6) :

$$E_{mono} = \frac{dh}{dr_1} = \frac{-1}{\cos \theta_1}$$

Plus l'incidence est faible, plus l'erreur est faible, de l'infini vers 1 pixel. En effet, en s'éloignant du capteur, l'ambiguïté altimétrique augmente. Comme en stéréoscopie, le pointé monoculaire ne permet pas d'aboutir à une précision subpixellique. La mesure monoculaire est plus précise que la mesure stéréoscopique si :

$$\left| \frac{E_{mono}}{E_{stereo}} \right| < 1 \quad \Leftrightarrow \quad |\theta_1 \pm \theta_2| < \pi/2 - \theta_1$$

Dans le cas de visées opposées, la mesure monoscopique est plus précise si : $\theta_2 < \pi/2 - 2\theta_1$. Ceci est possible si $\theta_1 < \pi/4$. Elle traduit que le second angle d'incidence doit être d'autant plus petit que le premier augmente. Cela correspond à diminuer la base entre les deux trajectoires qui conduit à un recouvrement croissant des deux cercles distance-Doppler. L'intersection devient moins nette et le calcul stéréoscopique moins précis.

Dans le cas de visées de même côté et si $\theta_1 < \theta_2$, l'inégalité est toujours vraie. La mesure monoculaire, connaissant la localisation planimétrique, est plus précise qu'une mesure stéréoscopique.

Notons que cette comparaison est menée entre une mesure stéréoscopique donnant la localisation globale et une mesure monoscopique aboutissant à une altitude relative.

II.5. Evaluation des configurations RAMSES

Sur cas réel, le modèle d'erreurs permet d'évaluer une configuration quelconque ou d'indiquer le type de configuration à favoriser pour atteindre des précisions données connaissant les erreurs de mesures. A partir du jeu de données RAMSES initial, l'opportunité de chaque couple est étudiée. Les angles Doppler sont faibles, inférieurs à 5° , et les trajectoires quasiment parallèles ($G < 3^\circ$).

On constate sur le tableau 2-2 que pour un angle stéréoscopique faible de l'ordre de 5° , les erreurs de localisation deviennent trop grandes pour les précisions recherchées. Par contre, les couples avec un angle stéréoscopique supérieur à 10° nous semblent opportuns. Le tableau équivalent avec les coefficients exprimés en pixel sol de taille *TDS* se trouve dans l'ANNEXE E.

Nous avons vérifié que les précisions requises sur les paramètres, positions et vitesses, pour obtenir une précision de localisation pixellique sont compatibles avec celles des mesures du système RAMSES, indiquées dans [BOUTRY98]. Il est apparu que sans normalisation du système, les précisions requises sont proches de celles fournies. Avec la normalisation, la précision requise sur la vitesse est largement moins contraignante. Ceci résulte intuitivement du passage en distance pixellique lors de la normalisation. En effet, les erreurs de mesures de position et de vitesse sont mises au même niveau alors qu'elles sont cependant plus grandes pour les positions que pour les vitesses.

zone	couple	$\Delta\theta$	impact erreur de colonne			impact erreur de ligne			impact erreur mono sur l'altimétrie (replètement)
			planimétrie	altimétrie	localisation globale	planimétrie	altimétrie	localisation globale	
A	vue1+vue2	10°	4.1	3.0	5.1	0.7	0.1	0.7	1.2
	vue1+vue3	25°	1.4	1.4	2.0	0.7	0.1	0.7	1.2
	vue2+vue3	15°	1.9	2.2	2.9	0.8	0.3	0.8	1.4
	vue4+vue2	5°	4.5	2.9	5.4	0.4	0.1	0.5	1.3
B	vue2+vue1	5°	9.8	8.6	13.0	1.1	0.7	1.3	1.3
C	vue1+vue2	10°	4.9	3.4	6.0	0.9	0.3	0.9	1.1
	vue1+vue3	30°	1.4	1.4	2.0	0.7	0.1	0.7	1.1
	vue2+vue3	20°	1.8	2.1	2.8	0.7	0.2	0.7	1.3
	vue5+vue4	10°	4.6	3.9	6.0	1.0	0.3	1.0	1.2
D	vue1+vue2	5°	7.8	6.6	10.2	1.6	1.2	2.0	1.2

tableau 2-2 : erreur de localisation en pixel radar pour une erreur de disparité de 1 colonne ou 1 ligne en stéréoscopie et impact d'une erreur de 1 colonne sur la mesure de hauteur en monoscopie par estimation de la longueur du replètement

III. Analyse de l'information 3-D sur les échos forts des structures

L'objectif de cette analyse est de vérifier la pertinence de l'information 3-D contenue sur les échos forts. Nous avons vu au chapitre 1 que ces échos sont issus de réflexions spéculaires simples depuis le bord du toit ou le coin diédrique sol/structure, de rebonds doubles dans ce dièdre et éventuellement de rebonds triples. Ces structures brillantes apparaissent comme une succession d'échos forts ponctuels. Rien n'assure que ces échos résultent d'un même point sur le terrain entre les deux images, acquises sous des angles d'incidence différents. Nous étudions donc la cohérence entre l'interprétation donnée dans le chapitre 1, II.1.2, et la localisation altimétrique et planimétrique calculée par stéréoscopie après appariement de ces structures brillantes. Ceci est réalisé sur deux exemples de structures : des pylônes et un gazomètre. L'analyse comprend l'appariement manuel des échos forts et le calcul stéréoscopique.

III.1. Etude sur des pylônes

On observe sur la figure 2-11 qu'un pylône est représenté par deux échos forts ponctuels alignés horizontalement sur l'axe des distances. S'appuyant sur l'interprétation des échos forts (chapitre 1, I.3.4.4 et II.1.2), le premier écho correspond à un point situé en haut du pylône et le second est l'écho double résultant du coin diédrique. Le second spot est plus fort et plus large. Entre ces deux spots, on constate que la rétrodiffusion du sol prédomine sur d'éventuels échos renvoyés le long du pylône. Si ces échos sont issus du même point sur le terrain, l'appariement manuel des spots et le calcul stéréoscopique doit aboutir aux résultats suivants :

- le premier écho indique l'altitude d'un pylône et sa localisation planimétrique,
- le second est situé au sol et à la même planimétrie que le premier.

Pour vérifier ceci, nous effectuons les opérations suivantes :

- les deux spots de chaque pylône sont associés manuellement avec leur correspondant dans la seconde image. Pour cela, nous sélectionnons le pixel d'amplitude maximale pour chaque spot. Nous supposons que l'ordre est conservé, c'est-à-dire que le premier écho correspond au premier écho sur l'image droite et le deuxième avec le deuxième.
- Les coordonnées 3-D pour chaque couple sont calculées par stéréoscopie.

Ces opérations sont effectuées sur 10 pylônes. Dans le tableau 2-3, la différence moyenne d'altitudes entre les deux échos (écho 2 – écho 1) sur les dix pylônes est de 14.7 pr pour une localisation planimétrique proche (distance de l'ordre du pixel). Les écart-types sont assez faibles pour conclure sur l'adéquation entre l'information 3-D obtenue et l'interprétation simplifiée précédente. Par ailleurs, on note qu'en moyenne, la précision relative d'une configuration à l'autre en planimétrie et en altimétrie, est très bonne, plus fine que la taille du pixel. Ceci prouve la qualité géométrique des données après correction des CPDV.

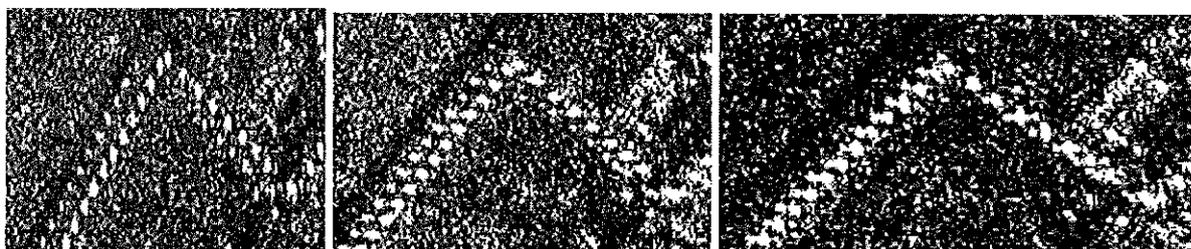


figure 2-11 : trois vues stéréoscopiques (a, b et c) de pylônes en géométrie radar, bande S

couple	vue a-vue c	vue c-vue b	vue b-vue a
angle stéréoscopique	30°	20°	10°
altitude écho 2 – altitude écho 1 (en pr)	14.7 ± 1.1	14.1 ± 1.3	15.2 ± 2.4
écart planimétrique entre les 2 échos (en pr)	1.3 ± 0.4	1.1 ± 0.5	1.1 ± 1.5

tableau 2-3 : moyenne et écart-type des distances en altimétrie et en planimétrie entre les deux échos successifs de chaque pylône sur 10 pylônes

III.2. Etude pour un gazomètre

Nous disposons de trois vues stéréoscopiques d'un gazomètre (figure 2-12) ainsi que de photos (figure 2-13). La cuve est représentée par quatre échos forts circulaires successifs et le toit est noir du fait de la réflexion miroir du rayon vers la direction opposée au radar. Les photographies montrent que cette cuve a un toit mobile et une passerelle qui l'entoure à la jonction entre les parties fixe et mobile.



figure 2-12 : trois vues stéréoscopiques d'un gazomètre en géométrie radar, bande S



figure 2-13 : photographies du gazomètre. Par rapport à la visée, le tuyau passe derrière la cuve et la route est vue avant la cuve. Entre ces deux images, on peut observer un changement de hauteur de la partie supérieure située au-dessus de la passerelle, signifiant que le toit est mobile.

III.2.1. Interprétation simplifiée

Trois éléments pouvant engendrer des phénomènes spéculaires sont identifiés :

- le bord de la cuve, crénelé et mobile,
- la passerelle fixe,
- le coin entre la cuve et le sol.

En s'appuyant de l'analyse de l'image radar des structures (chapitre 1, II.1.2), nous pouvons donner l'interprétation simplifiée suivante :

- l'écho 1 correspond à la réflexion directe depuis le haut de la cuve,
- l'écho 2 correspond à la réflexion directe sur la passerelle,
- l'écho 3 correspond à l'écho double,
- l'écho 4 pourrait résulter d'un rebond triple. En effet le coin entre la passerelle et la cuve peut se comporter comme un réflecteur très fort.

III.2.2. Extraction des échos

Des pointés manuels comme pour les pylônes ont été réalisés. La sélection de couples le long des échos circulaires ont été effectués sur les images rectifiées, en choisissant à chaque fois les pixels correspondant à un pic d'amplitude. Pourtant, le calcul 3-D n'a pas abouti à des mesures planimétriques et altimétriques cohérentes avec l'interprétation et les altitudes mesurées varient fortement le long d'un même écho. Nous proposons alors d'extraire pour chaque écho circulaire, le cercle qui passe par les valeurs d'intensités maximales par une méthode semi-automatique, puis l'appariement manuel des centres. Les quatre cercles peuvent approximativement être décrits par le même rayon. Les structures étant déformées en géométrie radar, l'extraction est réalisée sur les images géoréférencées (projetées dans le repère géographique à altitude nulle). Les centres et rayons sont choisis de façon manuelle. Un affinage automatique permet de positionner plus précisément les cercles sur l'arc dont le cumul des intensités est maximal (figure 2-14).



figure 2-14 : cercles extraits sur les trois vues stéréoscopiques après géoréférencement

III.2.3. Mise en correspondance des échos

Les centres des cercles sont associés manuellement. Les résultats du calcul stéréoscopique sont donnés dans le tableau 2-4.

résultats (en pr)	vue a - vue c	vue b - vue c	vue a - vue b
angle stéréoscopique	30°	20°	10°
écho 1 : altitude	79.4	82.2	76.5
erreur planimétrique	2.5	3.6	7.4
écho 2 : altitude	56.0	55.1	56.4
erreur planimétrique	2.9	3.3	5.1
écho 3 : altitude	15.1	15.1	14.5
erreur planimétrique	0.7	2.0	3.8
écho 4 : altitude	-25.2	-24.5	-25.8
erreur planimétrique	0.9	2.4	0.4

tableau 2-4 : position 3-D des centres des cercles (erreur planimétrique par rapport à la réalité terrain, ANNEXE C) exprimée en pixel radar

III.2.4. Validation

Sauf pour le premier écho, la précision de mesure d'altitude d'une configuration à l'autre est pixellique. Ainsi, on retrouve bien des altitudes décroissantes de l'écho 1 à l'écho 4 pour une localisation planimétrique proche. Les précisions planimétriques sont entre 0.4 et 7.4 pr. Les erreurs sont dues à l'imprécision des cercles et à la limitation géométrique des configurations. Ainsi, les écarts planimétriques entre les échos sont plus grands pour le couple vue a – vue b, dont l'angle stéréoscopique de 10° est le plus petit des trois. L'écart de localisation entre les trois configurations sur l'écho 1 peut s'expliquer par le fait que la vue b a été acquise à une date différente des deux autres vues. Un changement d'altitude est alors détecté.

Dans le tableau 2-5, le changement de hauteur de la partie mobile et la hauteur de la partie fixe sont vérifiés par mesure monoscopique sur chaque vue. Pour cela, la longueur du repliement est mesurée manuellement entre l'écho 3 correspondant à l'écho double et situé au sol, et les échos 1 et 2. Nous trouvons que le toit sur la vue b est plus haut d'environ 3 pr par rapport à la vue a. La hauteur trouvée sur la passerelle est compatible avec l'altitude stéréoscopique obtenue.

Dans le tableau 2-6, l'hypothèse du rebond triple est validée par le calcul du point théorique en fonction de l'altitude du sol (écho 3) et de la passerelle (écho 2) d'après l'équation 1-10. Les différences entre points théorique et réel sont assez faibles pour confirmer l'interprétation. Pour le couple vue a – vue b, la différence d'altitude est plus importante que pour les deux autres configurations, du fait des erreurs de localisation des cercles et aussi de l'angle stéréoscopique de 10° seulement.

	vue a	vue b	vue c
altitude relative du haut de la cuve (en pr)	64.4	67.3	65.7
altitude relative de la passerelle (en pr)	39.4	39.5	38.5

tableau 2-5 : mesure monoscopique des hauteurs sur les repliements d'après la formule $dh = \Delta r / \cos \theta$ avec $\cos \theta \approx H / r$, à partir de l'écho double situé au sol

	vue a - vue c	vue c - vue b	vue b - vue a
différence (en pr)	0.2	0.4	-1.6

tableau 2-6 : différence entre l'altitude théorique pour le rebond triple, calculée entre les échos 2 et 3 (équation 1-10) et celle de l'écho 4

IV. Conclusion

Ce chapitre a fourni l'analyse géométrique des données stéréoscopiques RAMSES et l'étude de l'information 3-D contenue dans les échos forts.

Pour l'analyse géométrique, le calcul théorique d'un modèle d'erreurs nous a permis d'étudier le pouvoir stéréoscopique des configurations. Il en découle que les configurations de 5° d'angle stéréoscopique ne sont pas exploitables pour la restitution de structures 3-D : l'erreur de localisation due à une erreur de disparité est en effet trop pénalisante pour les précisions recherchées. En revanche, la faisabilité est vérifiée pour des angles de 30° où l'erreur induite par les erreurs de mise en correspondance reste de l'ordre de la taille du pixel. L'utilisation des données nous semble également possible à partir de 10°.

L'analyse stéréoscopique sur les échos forts des structures nous a ensuite permis de vérifier l'interprétation simplifiée systématique proposée dans le chapitre 1 et de s'assurer que les échos forts fournissent une information 3-D pertinente. La mise en correspondance d'échos forts ponctuels comme pour les pylônes est opportune. Par contre, l'association manuelle de quelques points sur les arrangements d'échos forts comme pour le gazomètre, même les maxima locaux, n'est pas recommandée car elle n'a pas abouti à une information 3-D cohérente. Pour être fiable, ces mesures stéréoscopiques semblent devoir être effectuées après l'extraction des structures brillantes. Ceci peut être vu comme une moyenne sur toute la structure brillante. Nous pouvons conclure que dans un contexte radargrammétrique, le premier écho issu du bord du toit et l'écho double permettent d'obtenir la localisation planimétrique de la structure. Seul le premier fournit sa hauteur. L'écho double indique l'altitude du sol. Ce résultat est d'autant plus important qu'en l'absence de texture sur les toits et de visibilité des ombres, les échos forts restent la seule alternative pour restituer les structures 3-D.

PARTIE 2 : PROPOSITION D'UNE CHAÎNE ALGORITHMIQUE EN RADARGRAMMETRIE HAUTE RESOLUTION

Nous proposons dans cette seconde partie une méthode de construction de MNE, adaptée aux images copolaires représentant des structures industrielles. La construction du MNE soulève deux problèmes :

- on observe essentiellement des contours : les méthodes classiques de mise en correspondance dense vont au mieux aboutir à une carte des disparités sur les contours des structures. Ces contours correspondent à une même localisation planimétrique mais à des altitudes différentes dans le repère cartographique.
- L'écho du bord du toit n'est pas toujours visible : dans ce cas, la structure peut être détectée par l'écho double qui donne sa localisation planimétrique. Sans autre source d'information, la hauteur n'est pas renseignée.

Pour s'affranchir des problèmes de non détection ou des 'non-vus', F. Tupin [TUPIN01] présente une méthode de construction de MNE semi-automatique par coopération d'images radar et d'images optiques ou de cartes. Nous choisissons de rester dans un cadre purement radar afin d'exploiter le plus possible ces données et de conclure sur leur opportunité.

Le MNT de la figure 3-1 est obtenu par un algorithme classique de corrélation dense (cf. chapitre 4, IV.1). Seul le bâtiment au centre de l'image et au toit texturé est partiellement restitué. On retrouve bien que les échos doubles sont à l'altitude du sol. Par ailleurs, les disparités autour des échos forts semblent 'baver'. L'utilisation de primitives permettrait de limiter ce phénomène et de réhausser les discontinuités d'altitudes entre sol et sursol, mais ne donnerait pas la composition de la scène.

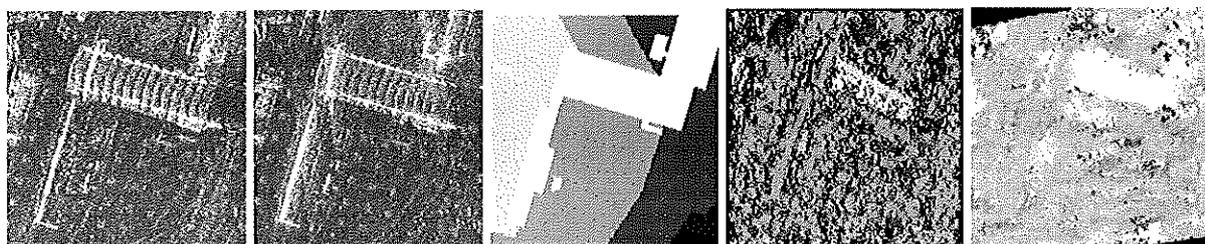


figure 3-1 : couples d'images radar en bande S sur quelques bâtiments, vérité terrain (BDTopo®),
carte des disparités et MNT

La construction du MNE doit donc passer par une phase d'extraction des structures pour délimiter leurs bords et lever l'ambiguïté sur l'altitude. Cette extraction peut être effectuée avant ou après le calcul de la carte de disparité. L'analyse menée dans la partie 1 ayant montré que l'écho double est un indicateur fiable sur la présence d'une structure, nous proposons d'extraire les structures brillantes en forme d'arcs de cercles ou de 'L'. La majorité de ces échos correspondent aux échos doubles. En

stéréoscopie, les échos doubles ne donnent pas la hauteur de l'objet. Les altitudes des structures doivent alors être recherchées dans un deuxième temps.

Le chapitre 3 concerne l'extraction des structures sur une seule image d'amplitude à partir des échos forts. Nous nous intéressons aux structures brillantes en forme d'arcs de cercles et de 'L', susceptibles de représenter des objets du sursoi cylindriques et parallélépipédiques tels que cuves et bâtiments rectangulaires.

Dans le chapitre 4, la méthodologie de construction du MNE est détaillée. Elle comprend l'extraction des structures étendue à la stéréoscopie et le calcul des altitudes du sol et des hauteurs des structures détectées.

Chapitre 3 : Extraction de structures industrielles

Ce chapitre concerne l'extraction de structures industrielles sur une seule image d'amplitude à partir des structures brillantes en forme d'arcs de cercles pour les cuves et de 'L' pour les bâtiments rectangulaires. La plupart de ces arrangements correspondent aux échos doubles. Le traitement stéréoscopique est abordé dans le chapitre 4.

Nous exposons la problématique dans la section I. Dans la section II, nous proposons une méthode d'obtention d'un masque binaire sur les structures brillantes.

Le chapitre se poursuit par l'extraction des cuves (section III). Deux techniques fondées sur la transformée de Hough (TH) circulaire sont mises en œuvre pour extraire les demi-cercles brillants. Nous comparons leurs performances par la simulation d'images de demi-couronnes brillantes représentant la signature d'une cuve et montrons leurs limitations. Face à ces limitations, nous nous sommes orientés vers une approche différente de la TH comprenant deux étapes : l'initialisation et la reconnaissance de forme par optimisation d'un critère surfacique, visant à trouver la meilleure forme demi-couronne englobant la structure brillante. Les images simulées nous permettent d'évaluer les performances de cet algorithme et de le comparer avec les deux précédents. Il est ensuite appliqué sur les images RAMSES.

Suite à l'étude sur les cuves, nous nous intéressons à l'extraction des bâtiments dont l'écho double est un 'L' brillant (section IV). La transformée de Hough est utilisée pour donner l'orientation principale des bâtiments et les détecter. La méthode de reconnaissance de forme utilisée pour les cuves est ensuite étendue au cas des 'L' des bâtiments.

I. Problématique

I.1. Position du problème

Nous proposons d'extraire les structures cylindriques et parallélépipédiques à partir des arrangements d'échos forts.

Nous modélisons de façon simplifiée l'image radar d'une cuve par un arc brillant correspondant à l'écho double ou aux échos forts issus du toit (figure 3-1). En bande S, les échos forts du bord du toit se réduisent à deux spots et en bande X, ils sont représentés par des arcs brillants de sens positifs ou négatifs par rapport à la direction de visée. Dans le cas d'un toit flottant (cf. figure 1-25), l'écho double qui se produit entre le toit flottant et le mur intérieur de la cuve est de sens négatif à une distance correspondant à une altitude comprise entre celle du toit et celle du sol.

Dans le chapitre 1, nous avons vu que la plupart des bâtiments recherchés forment un 'L' brillant. La modélisation simplifiée pour un bâtiment est alors composée d'un 'L' brillant correspondant à l'écho double, de l'écho du bord du toit s'il existe et éventuellement d'un toit texturé (figure 3-1).

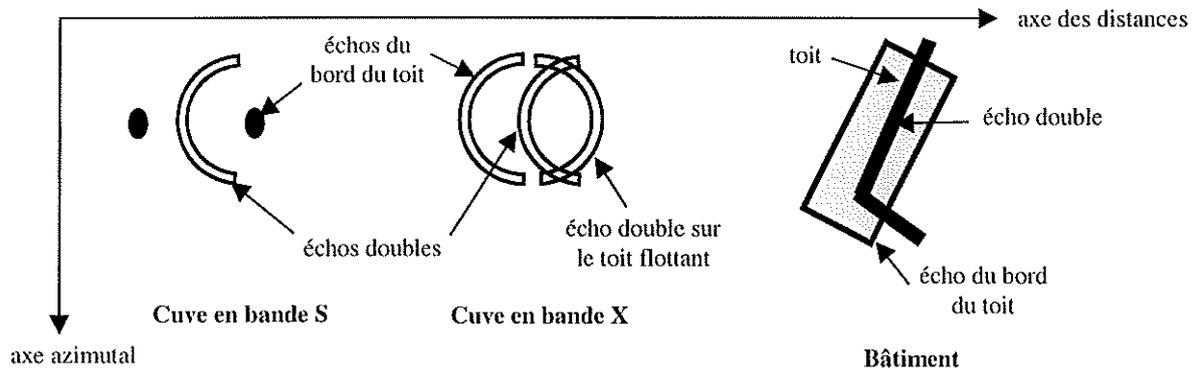


figure 3-1 : modélisation simplifiée de l'image radar d'une cuve en bande S, d'une cuve à toit flottant en bande X et d'un bâtiment

L'écho double est apparu comme l'écho le plus fort et semble être un indicateur fiable sur la présence d'une structure. Nous proposons donc de rechercher ces structures brillantes circulaires et linéaires. La plupart de ces arrangements correspondent aux échos doubles mais aussi à des échos du bord du toit ou d'autres éléments de la scène. Plusieurs difficultés doivent être résolues :

- il faut pouvoir décider si l'arrangement extrait est un écho double ou un écho du bord du toit,
- les échos doubles ne fournissent qu'une information partielle sur la forme de la structure car celle-ci est vue sous un seul côté,
- l'extraction est difficile car même si les caractéristiques radiométriques des échos forts sont très différentes de celles du sol, l'amplitude varie fortement le long des structures brillantes,
- la disposition des objets dans la scène, proximité et alignement, est susceptible de créer des ambiguïtés d'interprétation lors d'une extraction automatique,
- l'épaisseur des structures brillantes peut induire des imprécisions de localisation des arcs ou des segments extraits,

- les images contiennent des objets de tailles différentes : rayons des cuves entre 5 et 45 pixels et longueurs des bâtiments entre 5 et quelques centaines de pixels.

I.2. Démarche

De nombreuses études concernent la classification d'images RSO basse résolution en plusieurs classes telles que végétation, routes et zones urbaines. Du fait de la disponibilité récente de données haute résolution, encore peu de travaux concernent l'extraction du bâti. Dans ces études, les approches consistent généralement à extraire les toits texturés par un algorithme de classification (cf. études monoscopiques et interférométriques, Chapitre 2 - I.2). Notre contexte se rapproche davantage des travaux rapportés dans [KUTTIKKA96] : les bâtiments sont restitués à partir des lignes brillantes, obtenues par un détecteur d'échos forts, et des ombres, issues d'une classification. La méthode présentée dans [KUTTIKKA96] consiste à agrandir un rectangle s'appuyant sur une ligne brillante assez longue, jusqu'à rencontrer l'ombre. Notre cas est différent dans le sens où les ombres n'étant pas toujours exploitables, nous n'utilisons que les échos forts.

Les cuves sont visuellement de forme ellipsoïdale sur l'image radar et les angles droits n'y sont pas conservés. Afin de simplifier l'extraction, nous travaillons donc sur les images géoréférencées. La conservation des formes circulaires des cuves et des angles droits pour les 'L' des bâtiments sur les images géoréférencées est vérifiée dans le paragraphe I.3. Nous proposons ensuite d'utiliser le résultat de la classification pour extraire les structures brillantes linéaires et circulaires. Afin de rendre l'information plus pertinente, un masque binaire sur les échos forts est construit par fusion de l'image classifiée avec la détection des structures brillantes linéaires et circulaires (section II). L'extraction des cuves est alors abordée (section III). A partir des cuves, nous dégageons une méthode adaptée qui est ensuite étendue à l'extraction des bâtiments (section IV).

I.3. Conservation des formes dans l'image géoréférencée

L'opération de projection sur un plan d'altitude constante n'est pas linéaire. Nous proposons d'estimer la déformation d'une droite par cette projection en se plaçant dans le cas de visées de même côté, de trajectoires parallèles et d'angles Doppler nuls. On note (figure 3-2) :

- h_p , l'altitude du plan de projection,
- Y_1 la coordonnée sur l'axe y_1 de P ,
- Y'_1 la coordonnée sur l'axe y_1 de P projeté sur le plan d'altitude h_p ,
- h l'altitude de P .

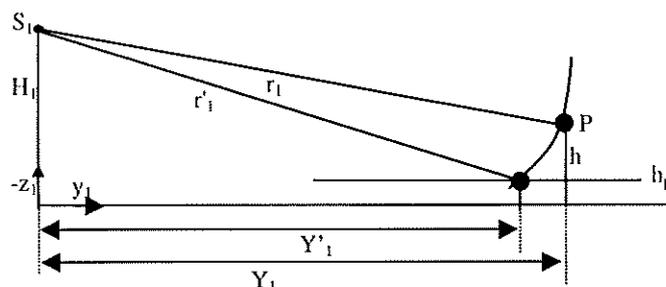


figure 3-2 : projection du point P à une altitude h_p différente de son altitude h

En projetant avec la mauvaise altitude, on fait l'hypothèse de l'égalité suivante :

$$r_1 = r_1', \text{ soit } Y_1^2 + (H_1 - h)^2 = Y_1'^2 + (H_1 - h_p)^2$$

On obtient donc :

$$\frac{\partial Y_1'}{\partial Y_1} = \left(1 - 2 \frac{e_h (H_1 - h_p)}{Y_1^2} + \frac{e_h^2}{Y_1^2} \right)^{-1/2} \text{ avec } e_h = h - h_p$$

En effectuant un développement limité à l'ordre 1 ($e_h \ll Y_1$), on a alors pour $h_p = 0$:

$$\frac{\partial Y_1'}{\partial Y_1} = e_h \frac{H_1}{Y_1^2} = e_h \frac{1}{H_1 \tan^2 \theta_1}$$

L'écart entre le vrai point et le projeté diminue avec l'altitude du porteur et l'incidence et augmente avec l'erreur commise sur la hauteur. Ceci signifie qu'une droite dans la direction de visée se projète en un arc dont la courbure croît avec l'angle d'incidence. D'une part, l'altitude du plan de projection doit donc être choisie égale à une altitude proche de celle du sol, si elle est connue. D'autre part, pour une même erreur d'altitude sur la projection, la déformation est négligeable dans le cas satellitaire et non dans le cas aérien. En effet, la variation de l'angle d'incidence en aérien est telle que cet effet pourrait atteindre plusieurs pixels et être visible en très haute résolution.

Dans notre cas, cet effet n'a pas été observé et est sans doute confondu avec l'effet d'étalement des échos forts suite au traitement SAR. Pour une longueur de bâtiment typique, orienté avec un angle de 45° par rapport à la visée, l'erreur de projection varie entre 12 ps à faible incidence à moins de 1 ps à forte incidence. Au centre de la fauchée, on a une erreur de 3-4 ps.

Nous concluons que les formes circulaires et les angles droits sont localement conservés sur nos images. Les images géoréférencées peuvent donc être utilisées pour extraire des coins, des droites et des arcs en tolérant une certaine épaisseur afin de prendre en compte la courbure le long des longues structures.

II. Extraction des structures brillantes par fusion

La classe des régions à forte densité d'échos forts sur l'image classifiée (cf. Chapitre 1, II-2) fournit une première information sur la présence potentielle de structures. Cependant, cette classe contient également toute région de forte réflectivité : zone de compression, échos forts issus d'objets autres que du bâti (grillage, pipeline, pylônes, voitures, bateaux). Afin de rendre l'information plus pertinente, nous proposons de la coupler avec un détecteur de structures brillantes linéaires et circulaires. Ces lignes ou ces arcs peuvent correspondre aux échos doubles des structures, aux échos du bord du toit et aux échos provenant de routes, rails, etc. Cette fusion doit permettre d'écarter les régions denses en échos forts non linéaires ou circulaires dans l'image classifiée, de corriger les imprécisions de la classification et de diminuer le bruit de la détection des contours.

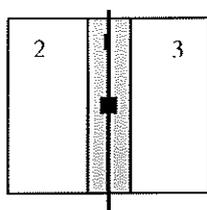
II.1. Détection des structures brillantes circulaires et linéaires

II.1.1. Choix du détecteur

Contrairement à l'optique, la détection des contours dans les images radar est rendue difficile à cause du speckle. Les détecteurs basés sur les gradients d'intensité ne sont pas adaptés au modèle multiplicatif car le taux de fausse alarme augmente avec l'intensité. En radar, on utilise donc les détecteurs à taux de fausse alarme constant (TFAC). Actuellement, le détecteur TFAC le plus répandu est sans doute le détecteur rapport des moyennes [TOUZI88]. Ce détecteur consiste à calculer le rapport des moyennes des niveaux de gris entre deux demi-fenêtres centrées sur le pixel étudié pour différentes orientations. Plus ce rapport est grand, plus le pixel a des chances d'être un contour. Une étude approfondie sur les détecteurs existants en radar et les détecteurs adaptés au cas multi-contour pourra être trouvée dans [FJORTOFT99]. R. Fjortoft démontre de plus que l'utilisation des données complexes permet d'améliorer la détection des contours sur des images avec un bruit corrélé.

Nous proposons d'utiliser le détecteur de structures linéaires présenté dans [TUPIN97]. Ce détecteur résulte de la fusion, DF, de deux détecteurs, DL1 et DL2 (figure 3-3). DL1 et DL2 se déduisent des détecteurs de contours D1 et D2 par utilisation d'une fenêtre à bande centrale large. Le test sur les moyennes de part et d'autre de la bande centrale permet de distinguer les lignes brillantes des lignes sombres. D1 est le rapport des moyennes. D2 renvoie le coefficient de corrélation entre la fenêtre sur l'image et la fenêtre idéale en présence d'un contour (marche entre deux régions parfaitement homogènes où chaque pixel aurait pour valeur la moyenne dans la demi-fenêtre sur l'image). Cette mesure de corrélation augmente avec le contraste entre demi-fenêtres et diminue avec les variances. Le détecteur fusion est appliqué avec exploration dans les huit directions, horizontale, verticale, diagonales et orientations intermédiaires. La meilleure de ces huit réponses est conservée ainsi que la direction correspondante.

Pour les structures circulaires, un voisinage à bande centrale circulaire a été testé. Les résultats ne sont pas apparus meilleurs qu'avec la bande centrale droite. Nous utilisons donc le même détecteur sur toutes les images pour détecter les structures brillantes linéaires et circulaires.



Détections :

$$DL1 = \text{MIN}(r_{12}, r_{13}) \quad r_{ij} = \text{MIN}(\mu_i/\mu_j, \mu_j/\mu_i), i, j \in \{1, 2, 3\}$$

$$DL2 = 1 - \text{MIN}(\rho_{12}, \rho_{13}) \quad \rho_{ij}^2 = 1 / (1 + n\beta_{ij})$$

$$\beta_{ij} = \frac{n_i\sigma_i^2 + n_j\sigma_j^2}{n_i n_j (\mu_i - \mu_j)^2} \text{ et } n = n_i + n_j$$

Recentrage : $DL1' = DL1_{\text{max}} - DL1 + 0.5$ $DL2' = DL2_{\text{max}} - DL2 + 0.5$

Fusion : $DF = 1 - \frac{DL1' \cdot DL2'}{1 - DL1' - DL2' + 2 \cdot DL1' \cdot DL2'}$ pour $\mu_1 > \mu_3$ et $\mu_1 > \mu_2$, 0 sinon

figure 3-3 : détecteur fusion, DF, de DL1 et DL2, pour une ligne brillante verticale. $DL1_{\text{max}}$ et $DL2_{\text{max}}$ sont les seuils fixés sur les deux détections pour une *pfa* (probabilité de fausse alarme) donnée

II.1.2. Choix des seuils

Pour le détecteur rapport des moyennes, le seuil $DL1_{max}$ peut être calculé théoriquement pour une pfa donnée à partir de la densité de probabilité de la variable 'rapport de deux moyennes'. Ce calcul a été réalisé pour des lois gamma pour des contours [TOUZI88] et des structures linéaires [TUPIN97]. Comme l'expression de la densité de probabilité du détecteur DL2 est difficile à donner, F. Tupin calcule le seuil $DL2_{max}$ empiriquement à partir de l'estimation de la courbe de la pfa . Cette courbe est tracée pour un contraste donné par tirage aléatoire de voisinages types dont les pixels sont distribués selon une loi Gamma. Le contraste choisi correspond au contraste minimal entre deux demi-fenêtres dans le cas du contour. Après recentrage et fusion des deux détecteurs (figure 3-3), un seuil de 0.5 est appliqué sur DF.

Dans le cas de lois Lognormales, $DL1_{max}$ est plus difficile à calculer sauf si on transforme l'image par le logarithme pour se ramener au cas gaussien. Les lois Lognormales étant une approximation de la distribution des amplitudes des échos forts, cette transformation ne paraît pas indiquée (cf. Chapitre 1, II.2). $DL1_{max}$ pourrait être estimé par simulation comme $DL2_{max}$. Nous proposons ici d'effectuer la fusion sans seuillage des deux détections et donc sans recentrage. Ceci présente l'inconvénient de donner plus d'importance au détecteur DL1 en présence d'un contour brillant car sa réponse ne diminue pas avec le coefficient de variation contrairement au détecteur DL2. De plus, les deux réponses n'ont a priori pas exactement la même 'dynamique'. Cependant les résultats nous ont paru suffisants avec cette méthode. Le seuil sur DF est alors déterminé empiriquement. Pour cela, la densité de probabilité du détecteur sur une zone homogène est estimée d'après les réponses de DF sur les pixels de la classe du sol dans l'image classifiée. Tout contour détecté dans cette zone peut être considéré comme une fausse alarme. Ceci nous permet de tracer la courbe de la pfa en fonction d'un seuil donné DF_{min} , selon l'équation :

$$pfa_s(DF_{min}) = pd_s(DF_{min}) = \int_{x > DF_{min}}^1 f_{DF,s}(x) dx$$

avec : pd_s la probabilité de détection d'un contour sur la région S (sol),
 $f_{DF,s}$ la densité de probabilité estimée du détecteur DF sur S .

A partir de cette courbe, le choix d'une pfa donne le seuil empirique DF_{min} . Nous utilisons dans la suite une pfa de 10% pour déduire le seuil DF_{min} . La pfa , généralement prise autour de 5%, est choisie volontairement plus grande pour s'assurer une perte minimale de contours significatifs. Notons qu'une pfa de 10% pour le détecteur rapport à huit directions dans le cas Gamma correspond empiriquement à une pfa de 2% pour une seule direction (formule indiquée dans [TUPIN97] : $pfa_8 = 1 - (1 - pfa_1)^5$).

II.1.3. Post-traitement

Le résultat après seuillage présente des contours épais et des fausses alarmes. Les fausses alarmes sont en général des chaînes de contours courtes sans cohérence sur les directions de gradient¹. Pour les supprimer et affiner les contours, on a souvent recours aux méthodes suivantes :

- la suppression des fausses alarmes par filtrage directionnel, qui consiste à supprimer les pixels isolés en direction [TUPIN97],

¹ Dans la suite, on appelle gradient la réponse du détecteur DF.

- l'obtention de contours fins par filtres morphologiques [TOUZI88], par transformée de Hough locale pour ne conserver que les points dont la direction du gradient est compatible avec la direction principale dans le voisinage [TUPIN97], par l'extraction de l'axe médian, par ligne de partage des eaux (LPE) pour la segmentation [FJORTOFT99], etc,
- le repositionnement des contours par exemple par contours actifs [GERMAIN00],
- la reconnexion des segments après squelettisation et polygonalisation des chaînes.

Nous avons réalisé plusieurs tests visant à faciliter la détection des bâtiments tels que : filtrages directionnels, filtres morphologiques, transformée de Hough, axe médian, squelettisation et polygonalisation. Les résultats obtenus présentent chacun un intérêt. En même temps, certaines connexions sont conservées ou perdues. Si en basse résolution, ces post-traitements sont souvent utilisés, en haute résolution, nous ne sommes pas parvenus à obtenir un compromis satisfaisant entre la suppression du bruit et la perte d'informations. Par ailleurs, l'étape de reconnexion des segments nécessite le choix de plusieurs paramètres comme la distance maximale de reconnexion et l'écart angulaire maximal. En haute résolution, ces paramètres sont difficiles à choisir puisqu'une erreur de reconnexion modifie l'interprétation de la scène : réunion de deux bâtiments proches par exemple. Nous avons donc décidé d'utiliser la réponse du détecteur sans autre traitement que le seuillage et la suppression des petites surfaces de taille inférieure à 10 pixels. Le résultat seuillé est cependant imparfait à cause du bruit et de la variabilité des amplitudes le long des échos doubles. Une fusion avec l'information issue de la classification utilisée dans le chapitre 1, II.2.2, est donc proposée.

II.2. Masque binaire par fusion

II.2.1. Fusion de la classification et de la détection des structures brillantes

Nous construisons le masque binaire des échos forts susceptibles d'être issus des structures par fusion des deux images binaires suivantes : masque sur les pixels brillants fourni par la classification et masque sur les structures brillantes obtenu par le DF. Pour être moins restrictif qu'un simple ET logique, nous utilisons une fusion qui prend en compte le voisinage de chaque pixel par vote majoritaire. Un pixel est retenu si le nombre de votes dans au moins une des deux images, est supérieur à 50% et 30% dans la seconde. Ceci traduit que l'on favorise la détection à la suppression de fausses alarmes. La taille du voisinage est fixée à 5x5.

Une autre possibilité aurait été d'inclure l'information des orientations des contours directement dans l'algorithme de classification. Ainsi, dans [TUPIN97], un terme directionnel est ajouté dans l'algorithme de classification pour favoriser le poids entre pixels situés sur une même ligne préalablement détectée.

II.2.2. Exemples de masques binaires

Nous utilisons des fenêtres dissymétriques lors de la détection, de taille 11x15 et bande centrale de taille 5 pour les images en bande S et de taille 9x13 et bande centrale de taille 3 pour les images en bande X dont les échos doubles semblent souvent plus fins.

Les figures suivantes (figures 3-4, 3-5, 3-6, 3-7, pixels retenus représentés en noir) donnent un aperçu des masques binaires obtenus. Il apparaît que les deux informations, classe des zones à forte densité d'échos forts et DF seuillé, se complètent bien. Ainsi, on obtient une image binaire moins bruitée et sans perte d'information importante pour notre objectif. On note cependant la perte de la connexité sur les arcs des grandes cuves de l'image en bande X (figure 3-6).

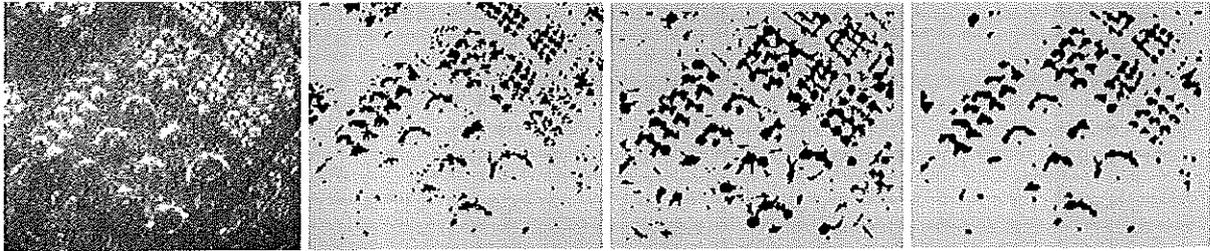


figure 3-4 : scène de cuves en bande S : image, classe des échos forts, DF seuillé et masque binaire

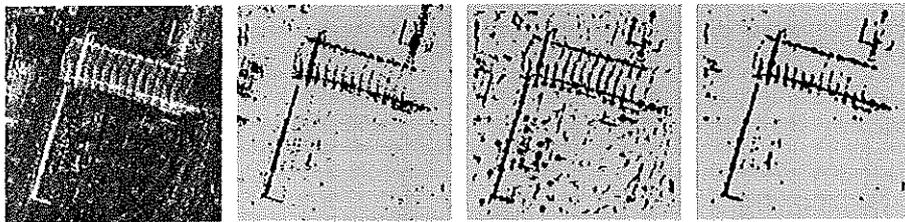


figure 3-5 : scène de bâtiments en bande S : image, classe des échos forts, DF seuillé et masque binaire

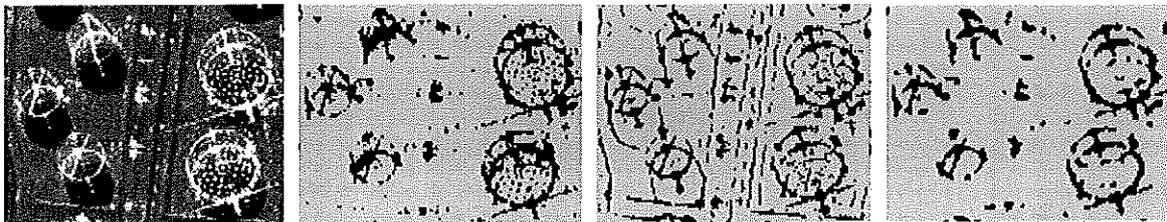


figure 3-6 : scène de cuves en bande X : image, classe des échos forts, DF seuillé et masque binaire

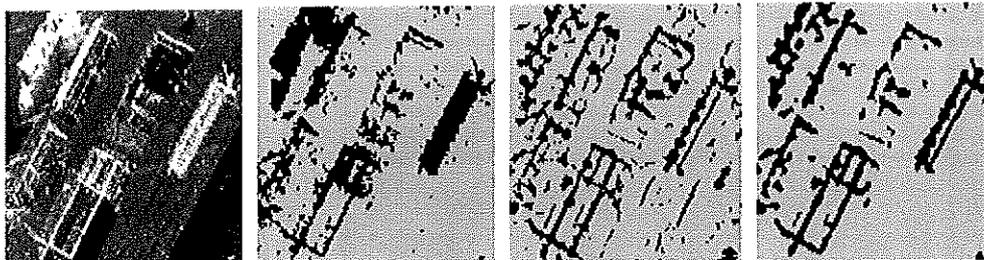


figure 3-7 : scène de bâtiments en bande X : image, classe des échos forts, DF seuillé et masque binaire

III. Extraction des cuves

Nous cherchons à extraire les cuves à partir des arcs de cercles épais et brillants, qui correspondent majoritairement à des échos doubles. La transformée de Hough est appropriée à l'extraction des arcs à partir des masques binaires, soit par une accumulation binaire, soit par une accumulation contrainte des gradients ou des intensités. Nous étudions donc plus en détail cette technique. Suite à une analyse appuyée par des simulations d'images de demi-couronnes brillantes,

nous montrons que la transformée de Hough présente certaines limitations qui rendent difficile sa généralisation. Une approche différente est donc proposée dans le paragraphe III.1.4. Elle comprend deux étapes : l'initialisation puis la reconnaissance de forme par optimisation d'un critère surfacique. Les deux approches sont comparées de façon quantitative et qualitative.

III.1. Extraction des cuves par transformée de Hough

Des rappels sont proposés pour avoir une vision globale sur les différentes techniques d'implémentation de la transformée de Hough. Nous abordons ensuite le problème de l'extraction de la structure brillante circulaire. Deux algorithmes, 3-D et 2-D, sont comparés par mesure de leur performance et test sur images réelles.

III.1.1. Rappels sur la transformée de Radon et la transformée de Hough

III.1.1.1. Présentation

La transformée de Hough (TH ou HT) fut introduite pour la détection de courbes paramétriques sur des images binaires [HOUGH62]. Le principe consiste à passer de l'espace image 2-D à l'espace transformé N -D où N est le nombre de paramètres décrivant la courbe recherchée. Chaque pixel P de l'image participe aux points de l'espace d'arrivée qui correspondent à une courbe dans l'image initiale passant par P . L'espace d'arrivée ou espace transformé est une table d'accumulation. Un pic dans la table d'accumulation indique la présence d'une courbe dont les paramètres sont indiqués par les coordonnées du pic dans la table.

Deans [DEANS81] montre que la TH est un cas particulier de la transformée de Radon (TR) [RADON17]. La TR consiste à intégrer une fonction 2-D, par exemple l'intensité en chaque point, le long de courbes analytiques :

$$a(V) = \iint_{image} f(x, y) \delta(V, x, y) dx dy$$

où $a(V)$ est la valeur accumulée pour la courbe décrite par le vecteur de paramètres V ,
 f est la fonction bidimensionnelle sur les pixels de l'image de départ,
 $\delta(V, x, y)$ est la fonction dirac traduisant l'appartenance du pixel (x, y) à la courbe décrite par V .

D'après [RODENAS99], l'intégrale est écrite pour une droite paramétrée en coordonnées polaires. Pour simplifier les notations, nous parlerons dans la suite de TH.

III.1.1.2. Etat de l'art

Un état de l'art sur la TH se trouve dans [ILLINGWO88]. Les points suivants y sont abordés : les avantages, les inconvénients, les différentes implémentations de la TH, les études de performance suivant la paramétrisation des courbes et la discrétisation des paramètres et le problème de la détection des pics. L'article [LEAVERS92] donne une mise à jour de cet état de l'art et met davantage l'accent sur les problèmes liés au bruit et à la détection des pics.

III.1.1.2.1. Avantages

Les principaux avantages sont :

- la détection de formes variées avec la transformée généralisée $G(eneralized)HT$ [BALLARD81],
- le traitement des images bruitées en se ramenant à la détection plus simple de pics dans une table d'accumulation,
- la robustesse aux parties manquantes,
- l'efficacité en terme de complexité de calcul par rapport à la mise en correspondance d'un modèle par déformations successives,
- la possibilité de paralléliser l'algorithme en parallélisant le traitement point à point.

III.1.1.2.2. Inconvénients

Les inconvénients mis en avant dans [ILLINGWO88] sont le temps de calcul et l'espace mémoire nécessaire au stockage de la table. Ces deux facteurs augmentent avec le nombre de paramètres à déterminer et le domaine de recherche de chaque paramètre. Deux types d'algorithmes tentent de résoudre ces limitations :

- la décomposition du problème en plusieurs sous-problèmes. Une première méthode repose sur l'utilisation des directions des gradients pour déterminer les paramètres séquentiellement (par exemple pour les cercles, recherche du centre puis du rayon [KIERKEGA92]). Une seconde approche consiste à détecter la courbe par morceaux (par exemple droites extraites par TH puis connexion des segments pour former des arcs [RODENAS99]),
- l'approche multi-résolution, visant au raffinement successif de la localisation du pic. La $F(ast)HT$ [LI85] considère l'espace transformé en sous-domaines qui sont étudiés plus particulièrement lorsque le nombre de votes y est supérieur à un seuil.

III.1.1.2.3. Paramétrisation et discrétisation

La paramétrisation des courbes et la discrétisation des paramètres et de l'image jouent un rôle sur l'efficacité de l'algorithme. Ces points ont fait l'objet d'études théoriques aboutissant à des conclusions concrètes, en particulier pour la détection des droites :

- Sur la paramétrisation : le codage des droites en coordonnées polaires avec l'origine de l'image comme référence est meilleur que celui en coordonnées cartésiennes [DUDA72].
- Sur la discrétisation : le pas des paramètres doit être supérieur à l'épaisseur du trait sinon il y a apparition de plusieurs pics autour de la vraie solution [VANVEEN81]. Van Veen montre que pour les droites décrites en coordonnées polaires (θ, ρ) , plus le pas $\Delta\rho$ est petit, moins il y a dispersion du pic en θ mais inversement en ρ . La dispersion du pic peut être réduite grâce à une fonction d'influence qui sert à pondérer la contribution des points en fonction de leur distance à la courbe ([KIRYATI91], la $F(uzzy)HT$ [HAN94]). L'utilisation d'un pas variable pour prendre en compte la différence de discrétisation d'une droite en fonction de sa pente permet également de diminuer la dispersion des pics [GUO99].

III.1.1.2.4. Sélection des pics

Les algorithmes de TH sont souvent présentés comme robustes aux parties manquantes et au bruit des images car ils ne nécessitent pas de modélisation du bruit. Leavers [LEAVERS92] fait cependant

remarquer que le seuil de sélection doit prendre en compte la dimension de la courbe et la discrétisation de l'espace. En pratique, le seuil de sélection est souvent choisi empiriquement ou proportionnellement au pic maximal. Les pics peuvent être réhaussés par utilisation de filtrages de la table d'accumulation, par la pondération de la valeur accumulée par l'intensité, le gradient ou par l'utilisation d'une fonction d'influence. Dans le cas d'une fonction d'influence, il faut néanmoins fixer la forme de la fonction et la distance maximale d'influence.

III.1.1.2.5. Bruit

Deux sources de bruit sur la table accumulée rendent difficile la sélection et la localisation précise des pics : le bruit aléatoire et le bruit de corrélation [LEAVERS92].

Le bruit aléatoire est dû au bruit dans l'image de départ. Des modélisations statistiques de ce bruit ont permis de mesurer la densité des contributions dues au bruit aléatoire (voir [LEAVERS92] pour plus de détails). Une alternative est la $P(\text{robabilistic})\text{HT}$ ou $R(\text{andomized})\text{HT}$ [XU90]. La RHT consiste à choisir itérativement p points de façon aléatoire, avec p le nombre de paramètres servant à décrire la courbe recherchée. La courbe passant par ces points la plus probable est calculée et la table d'accumulation est mise à jour. Le nombre de pixels traités doit augmenter avec la complexité des images pour diminuer les ambiguïtés, dues au bruit des images mais aussi au bruit de corrélation (voir ci-dessous). De plus, le nombre de combinaisons possibles étant très élevé, la table produite est éparse. Une autre approche est la $C(\text{urve})F(\text{itting})\text{HT}$ [LIANG90] où chaque point participe à la courbe la plus probable calculée sur un voisinage par exemple par moindres carrés.

Le bruit de corrélation est dû à la contribution combinée de pixels issus d'objets distincts. Il se traduit par la déformation des vrais pics et induit des pics ne correspondant pas à une vraie forme sur l'image. La $C(\text{onnective})\text{HT}$ [YUEN91] a été proposée pour résoudre ce problème. Elle consiste à pondérer la contribution d'un pixel à une courbe en fonction de l'appui des pixels voisins connectés. L'image des connexions en entrée de ce type de technique doit donc être fiable. La manière dont est pris en compte l'appui des voisins connectés doit également être définie.

Faisant suite aux RHT, CHT et CFHT, plusieurs variantes sont apparues : $R(\text{andomized})\text{CHT}$, $W(\text{indow})\text{RHT}$, $R(\text{andomized})W(\text{indowing})\text{RHT}$, $C(\text{onnective})R(\text{andomized})\text{HT}$ [KALVIAIN95]. La RCHT est une technique globale. Les autres reposent sur l'analyse locale des points participants : un pixel contour est choisi aléatoirement et participe à une courbe déterminée par RHT ou CFHT sur un voisinage. Ces techniques requièrent le choix judicieux de la taille de la fenêtre d'étude.

Une comparaison entre TH probabilistes (dont RHT, WRHT, CRHT, RWRHT) et non probabilistes ($S(\text{tandard})\text{HT}$, CHT) est menée dans [KALVIAIN94]. Le meilleur résultat est obtenu avec les méthodes à mémoire statique (SHT, CHT). Les méthodes probabilistes sont en revanche jusqu'à plus de 30 fois plus rapides que la SHT.

III.1.1.3. Application de la TH à la détection de cercles

Un cercle est décrit par trois paramètres : (x_0, y_0, r) . La transformation de l'espace image à l'espace transformé revient à incrémenter pour chaque pixel (x, y) tous les points (x_0, y_0, r) situés sur le cône de centre (x, y) , de hauteur et de base définie par le rayon maximum (figure 3-8). La contrainte de rayon minimal se traduit par l'élimination de la pointe du cône. La table d'accumulation est 3-D.

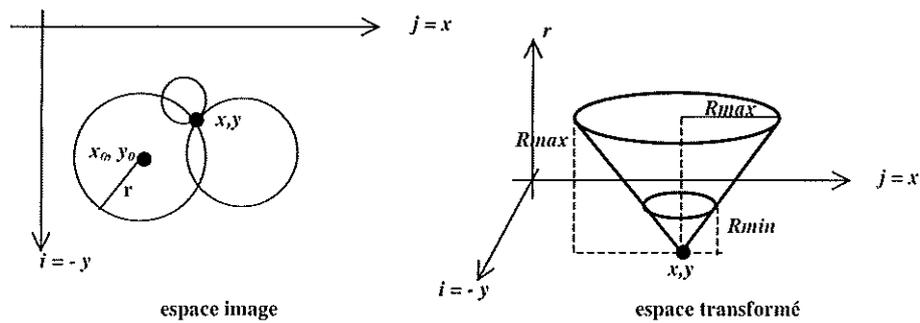


figure 3-8 : TH pour les cercles

Les techniques 2-D consistent à rechercher le centre par une TH 2-D, tous rayons confondus, puis le rayon par accumulation 1-D.

L'estimation du centre peut être faite à partir des directions des gradients ou non. Dans le premier cas, l'accumulation est effectuée le long des directions des gradients en chaque point [KIERKEGA92]. Dans la seconde catégorie, on trouve la méthode des cordes [IOANNOU99] qui repose sur le fait que la médiatrice des cordes d'un cercle passe par son centre. L'accumulation est donc effectuée le long des médiatrices entre deux points. Afin de réduire la sensibilité de la méthode aux parties manquantes et au bruit de corrélation, Ioannou et al. adoptent une approche CHT.

L'estimation du rayon repose sur une accumulation 1-D pour chaque centre détecté. Le maximum de l'histogramme résultant indique le rayon le plus probable. Cette accumulation peut prendre en compte l'épaisseur du cercle en accumulant à chaque fois plusieurs rayons consécutifs au lieu d'un seul rayon.

Plus rapide et moins gourmande en espace mémoire, la méthode 2-D souffre de la propagation des erreurs d'estimation du centre sur celle du rayon. Dans [YUEN90], cinq TH 3-D et 2-D sont comparées. Les auteurs concluent que les méthodes ont des performances équivalentes en terme de précision de résultats. Les méthodes 2-D sont beaucoup plus rapides mais tendent à perdre les petits cercles. En effet, la table d'accumulation n'est pas normalisée dans cette étude, ce qui favorise probablement les grands rayons.

III.1.2. Etudes des algorithmes de TH circulaire 3-D et 2-D

Nous proposons d'implémenter les deux méthodes, 3-D et 2-D, avec des adaptations pour répondre aux spécificités des échos forts recherchés. Sur les masques binaires (figures 3-4 à 3-7), nous observons que les structures brillantes circulaires recherchées présentent certaines caractéristiques susceptibles de limiter l'efficacité d'un algorithme de TH :

- la proximité et l'alignement des structures brillantes circulaires ainsi que les erreurs de connexion risquent de générer un bruit de corrélation important,
- un côté visible (demi-cercle), arc épais, parties manquantes et objets de taille différente, sont des éléments qui peuvent compromettre la sélection fiable des pics,
- la TH 2-D risque d'être limitée par l'alignement des objets dans la direction du gradient et par les imprécisions des directions de gradients dues entre autre à l'aspect ponctuel des arcs brillants.

Nous étudions donc l'apport de l'accumulation d'une valeur discriminante, les gradients, et l'influence de la normalisation de la table d'accumulation par le biais de simulation d'images de demi-couronnes. Des tests sur images réelles nous permettent ensuite de conclure sur la pertinence du choix

automatique d'un seuil de sélection et sur les performances des méthodes dans le cas de la détection d'objets de taille différente.

III.1.2.1. Mise en œuvre de la TH 3-D pour la détection de demi-couronnes

L'algorithme implémenté s'appuie sur le schéma de base : pré-traitement, accumulation, sélection des pics.

III.1.2.1.1. Pré-traitement

Les pixels qui participent à l'accumulation sont contraints d'après le masque binaire. Dans le cas de l'accumulation de valeurs réelles, deux seuils doivent être fixés : le seuil bas et le seuil haut. Le seuil bas limite l'accumulation aux pixels significatifs, essentiellement dans le but de gagner du temps. Le seuil haut borne la valeur accumulée pour éviter l'apparition d'un pic dans l'accumulateur résultant d'un seul pixel très fort. Pour fixer le seuil bas, sb , nous retenons deux possibilités :

- il est fixé manuellement, indépendamment du masque binaire,
- il est fixé à la valeur minimale des 80% des points du masque binaire qui ont les plus fortes valeurs de gradient.

Le seuil haut, sh , est pris égal à $\mu + 3\sigma$, avec μ (resp. σ) la moyenne (resp. l'écart-type) sur l'image des gradients, calculée pour les pixels du masque binaire. La valeur accumulée réelle peut être les gradients ou les intensités. Nous avons choisi les gradients qui semblent moins bruités.

III.1.2.1.2. Accumulation

Les éléments suivants sont utilisés lors de l'accumulation :

- la direction de visée supposée connue sert à contrôler la participation des points aux demi-cercles compatibles avec la visée. Cette contrainte permet de prendre en compte le fait qu'un seul côté n'est visible,
- un point participe aux cercles de rayon $r \pm \varepsilon$ pour prendre en compte l'épaisseur de l'arc.
- nous pondérons la valeur accumulée par le cosinus de l'écart angulaire entre la direction du gradient et le rayon issu du point traité (figure 3-9).

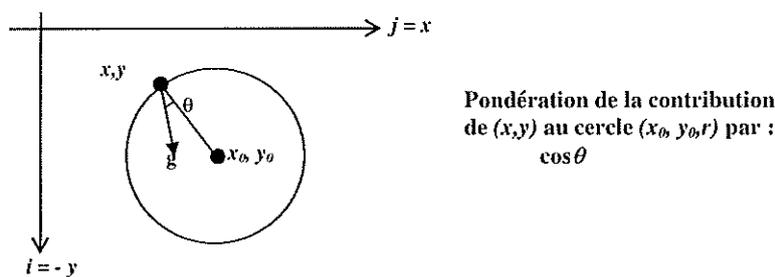


figure 3-9 : pondération par l'écart par rapport à la direction du gradient (g)

III.1.2.1.3. Sélection des pics

La sélection des cercles peut se faire de deux façons :

- le seuillage de la table et la sélection des pics sur chaque groupe résultant. Pour cela, certains utilisent la technique du clustering pour extraire les barycentres des groupes [RODENAS99] ou le quadrillage de l'image pour conserver un pic par case [KIERKEGA92],
- la sélection itérative du meilleur pic suivie de la mise à jour de la table pour retirer toutes les contributions des pixels situés sur l'objet sélectionné, et ce, tant que le pic sélectionné est supérieur au seuil de sélection.

La seconde approche nous semble plus appropriée pour diminuer le bruit de corrélation de façon efficace.

Sans normalisation de l'accumulateur, les cercles de plus grands rayons risquent d'être favorisés. Avec la normalisation par le nombre de points participants à chaque cercle ou par le rayon, les plus petits cercles sont cette fois favorisés. Nous testons donc les trois possibilités : sans normalisation, normalisation par le rayon et normalisation par le nombre de points participants. Une alternative serait d'adopter une approche multi-résolution où à chaque niveau de résolution, seuls les cercles dont les rayons varient entre deux bornes rapprochées seraient détectés. A cause du bruit des images et du bruit de corrélation, il est cependant probable que des cercles soient détectés à des niveaux de résolution différents sur une même cuve.

Le seuil de sélection des pics dépend de la valeur accumulée et de la normalisation. Le nombre de points participant au demi-cercle de rayon r et d'épaisseur e est théoriquement égal à $\pi.r.(e+1)$. Nous choisissons une épaisseur par défaut et retenons les seuils donnés dans le tableau 3-1. Le facteur 0.7 sert à prendre en compte le bruit des images.

	accumulation binaire	accumulation de réels
Sans normalisation	$0.7.\pi.r.(e+1)$	$0.7.\pi.r.(e+1).sb$
Normalisation par le nombre de points participants	<i>sans objet</i>	<i>sb</i>
Normalisation par le rayon	$0.7.\pi.(e+1)$	$0.7.\pi.(e+1).sb$

tableau 3-1 : seuils de sélection des pics en fonction du type d'accumulation et de la normalisation

III.1.2.2. Mise en œuvre de la TH 2-D pour la détection de demi-couronnes

L'algorithme 2-D testé repose sur la méthode exposée dans [KIEKEGA92]. Elle utilise la direction des gradients pour trouver les centres potentiels. Pour limiter le bruit de corrélation, nous adoptons également un algorithme itératif. A chaque étape, un centre est sélectionné, son rayon estimé puis la table est mise à jour. L'arrêt se produit lorsque le pic détecté lors de l'estimation du rayon, est inférieur au seuil de sélection. Les adaptations sont les mêmes que dans le cas 3-D à quelques modifications près :

- la pondération par la différence d'orientation entre gradient et rayon n'est pas utilisée puisque cette information serait redondante,
- seule la table 1-D lors de l'estimation du rayon doit être normalisée. Le seuil de sélection est choisi dans le tableau 3-1.

Pour prendre en compte l'imprécision des directions des gradients due au bruit et à la discrétisation, l'accumulation 2-D est réalisée à l'intérieur d'un cône autour de la direction [KIERKEGA92]. La

figure 3-10 montre que le centre trouvé est plus précis avec cette tolérance ($\pm 8^\circ$). Le pic est plus fort et lissé. Sur image réelle (figure 3-11), on observe que la tolérance permet d'obtenir une table 2-D lissée.

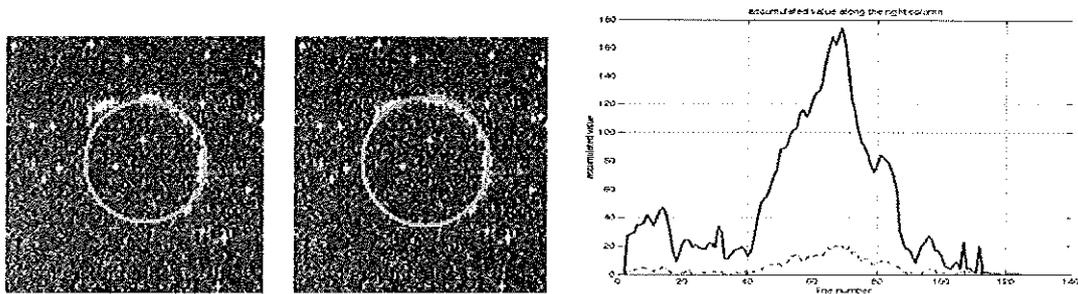


figure 3-10 : prise en compte de l'imprécision des directions des gradients lors de l'estimation des centres. Résultat sans et avec tolérance. Coupe de la table d'accumulation le long du bon indice de ligne du centre avec tolérance (trait plein) et sans tolérance (trait en pointillés)

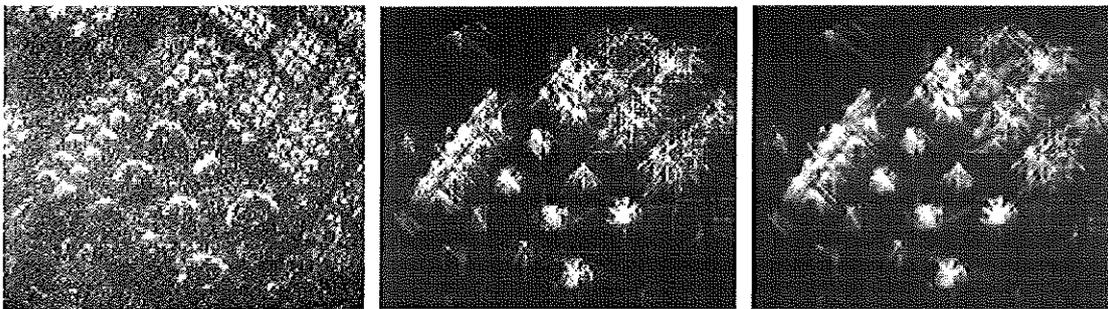


figure 3-11 : influence de la tolérance sur les directions des gradients sur l'estimation des centres : image, table d'accumulation (binaire) 2-D sans puis avec la tolérance

III.1.2.3. Comparaison des performances des TH 3-D et 2-D

Nous proposons de comparer la performance des deux algorithmes présentés suivant la valeur accumulée et la normalisation de la table. Pour cela, des images de demi-couronnes brillantes sont générées pour un contraste donné entre fond (sol) et forme (demi-couronne brillante). Ces images sont bruitées par un bruit multiplicatif de loi Lognormale (cf. ANNEXE F). Une image contient une demi-couronne. L'exécution des algorithmes sur un nombre suffisant d'images nous permet d'étudier statistiquement, en moyenne et en écart-type, les performances des méthodes.

III.1.2.3.1. Démarche

D'après ce qui précède, les dix algorithmes suivants sont testés :

- TH 3-D avec accumulation binaire, sans normalisation et avec normalisation par le rayon,
- TH 3-D avec accumulation des gradients, sans normalisation et avec normalisation par le rayon ou par le nombre de points participants,
- TH 2-D avec accumulation binaire, sans normalisation et avec normalisation par le rayon lors de l'estimation du rayon,
- TH 2-D avec accumulation des gradients, sans normalisation et avec normalisation par le rayon ou par le nombre de points participants lors de l'estimation du rayon.

Trois cents images sont créées pour trois contrastes différents, 2, 3 et 6. Pour chaque contraste, les rayons de la demi-couronne varient entre 11 et 35 pixels et l'épaisseur est de 3 ou 4 pixels. Douze images sont donc créées par rayon et par contraste. Les algorithmes sont exécutés sur toutes les images générées. Pour cela, les masques binaires sont automatiquement produits pour chaque image et les algorithmes s'arrêtent au premier demi-cercle détecté. Les résultats obtenus sont comparés avec les 'vérités terrain' afin d'effectuer des mesures statistiques sur les performances en fonction de la méthode, du contraste et du rayon. Le problème du seuil de sélection et l'étude du bruit de corrélation ne sont donc pas traités par cette simulation. Cependant, cette analyse nous permet d'étudier :

- la différence de comportement entre TH 2-D et 3-D en fonction du type d'accumulation et de la normalisation,
- les performances de détection en l'absence de bruit de corrélation (autre quelques échos forts ponctuels) en fonction du contraste et du rayon,
- la stabilité des méthodes par analyse des variances des mesures de performance.

III.1.2.3.2. Définition des mesures de performance

Pour chaque résultat obtenu, on calcule :

- n_v , le nombre de points dans la 'vraie' forme,
- n_d le nombre de points dans la forme détectée,
- n_c le nombre de points dans la forme détectée et la 'vraie' forme.

La TH fournissant le centre et le rayon, ces mesures sont calculées à partir de l'épaisseur supposée connue. Les performances sont estimées par les trois mesures suivantes :

- le pourcentage de pixels bien classés, P_t , correspondant à la probabilité de détection, et devant être maximal :

$$P_t = n_c / n_v$$

- le pourcentage de pixels mal classés, P_m , correspondant à un taux de fausses alarmes. Il doit être minimal :

$$P_m = 1 - n_c / n_d$$

- la mesure bilan, T , qui doit être maximale et est écrite par :

$$T = \frac{P_t + 1 - P_m}{2} = \frac{n_c(n_v + n_d)}{2n_v n_d}$$

Une autre possibilité serait de mesurer directement la distance au vrai centre et l'écart des rayons. Nous avons choisi les mesures définies ci-dessus car la méthode proposée dans la section III.1.4 suivante s'appuie sur la description surfacique de la structure brillante.

III.1.2.3.3. Résultats

La figure 3-12 représente la variation des écart-types des mesures P_t et P_m , par méthode et par contraste, en fonction du nombre d'images intervenant dans le calcul des statistiques. Cette courbe est tracée en fonction du nombre d'images traitées, allant de 12 à 300, avec un pas de 12 images. Elle nous permet de voir à partir de combien de réalisations l'estimation de l'écart-type (et donc de la

moyenne) est fiable. A partir de ce point, l'écart-type doit être quasiment constant et reflète la stabilité de la méthode. Plus il est grand, plus la performance de la méthode varie. Sur une seule image contenant plusieurs objets, il donne donc une prévision du pourcentage d'échecs de la détection au sens de la mesure considérée.

On constate qu'à partir d'environ 150 réalisations, les courbes sont stables et donc les mesures fiables. Les écart-types sont de l'ordre de 25% pour la TH 2-D et les TH 3-D binaire normalisée et non binaire normalisée par le rayon. Les TH 3-D non normalisées ont des écart-types autour de 30%. La TH 3-D avec accumulation des gradients et normalisation par le nombre de points participants a l'écart-type le plus faible, environ 5%. Par ailleurs, les TH 2-D avec accumulation des gradients, sont plus performantes en terme d'écart-type que les TH 2-D binaires.

Le tableau 3-2 présente les moyennes de chaque mesure (P_t , P_m et T) par méthode et par contraste. Les moyennes sont calculées sur les 300 réalisations d'images pour un contraste donné. Elles permettent d'estimer la performance d'une méthode en fonction du contraste et de comparer plusieurs méthodes en moyenne. Il apparaît que :

- les performances augmentent globalement avec le contraste,
- le meilleur algorithme de TH 2-D en moyenne est celui avec l'accumulation des gradients et la normalisation par le nombre de points participants. Les T et P_t moyens varient autour de 70% tandis que le P_m moyen se situe à environ 25%. Les performances des autres variantes sont proches, avec ou sans normalisation. On observe que l'amélioration des performances avec le contraste tend à se stabiliser,
- le meilleur algorithme de TH 3-D est celui avec l'accumulation binaire et sans normalisation. Le T moyen varie en fonction du contraste entre 70 et 80%, la P_t moyenne entre 80 et 90% et la P_m moyenne entre 40 et 30%. L'accumulation des gradients, sans normalisation, aboutit à des performances moyennes proches du meilleur algorithme 2-D. Les performances des algorithmes 3-D avec normalisation sont mauvaises,
- la P_m moyenne de la meilleure TH 3-D est près de deux fois plus importante à faible contraste que celle de la TH 2-D. Ceci signifie grossièrement que le demi-cercle trouvé par la TH 3-D a un rayon plus grand que le vrai, la P_t est donc forte et la P_m aussi.

	contraste=2			contraste=3			contraste=6		
Mesure en %	P_t	P_m	T	P_t	P_m	T	P_t	P_m	T
TH 2-D, accumulation binaire									
sans normalisation	64	32	66	66	28	69	70	26	72
avec normalisation par le rayon	62	31	66	64	27	69	68	25	72
TH 2-D, accumulation des gradients									
sans normalisation	66	24	71	67	25	71	71	24	74
avec normalisation par le nombre de points participants	69	26	72	70	26	72	73	25	74
avec normalisation par le rayon	64	26	69	65	25	70	70	24	73
TH 3-D, accumulation binaire									
sans normalisation	80	43	69	88	33	78	91	29	81
avec normalisation par le rayon	13	87	13	26	77	25	28	75	27
TH 3-D, accumulation des gradients									
sans normalisation	78	39	70	80	33	74	78	36	71
avec normalisation par le nombre de points participants	6	96	5	14	88	13	25	77	24
avec normalisation par le rayon	12	86	13	17	82	18	17	81	18

tableau 3-2 : performance moyenne suivant l'accumulation et la normalisation de la TH 2-D et 3-D pour trois contrastes : 2, 3 et 6. Statistiques calculées sur 300 réalisations par contraste

Etudions maintenant la figure 3-13. Elle montre la variation des moyennes de la mesure T par méthode en fonction du rayon. Cette courbe permet de conclure sur les performances d'une méthode suivant la taille de l'objet à détecter. Elle est tracée indépendamment du contraste, soit pour 36 réalisations par rayon. On observe immédiatement la différence de comportement entre les algorithmes 2-D et 3-D et entre les cas normalisés et non normalisés pour la TH 3-D. Ainsi en moyenne, les algorithmes 2-D ont un comportement similaire et atteignent une performance comprise entre 70% et 80% à partir d'un rayon de 14 pixels. Les TH 3-D avec normalisation voient leur performance chuter lorsque le rayon augmente, tandis que la performance augmente avec le rayon dans le cas non normalisé. La TH 3-D a donc un comportement sensible au rayon.

Nous concluons que pour des images contenant des objets dont l'ordre de grandeur de la taille est connue, la TH 3-D binaire permet d'atteindre une probabilité de détection moyenne supérieure à 80% mais avec un écart-type assez fort de 30%. Sinon, la TH 2-D avec accumulation des gradients et normalisation par le nombre de points participants, est préconisée. En effet, même si les performances sont moins bonnes, probabilité de détection autour de 70% et écart-type autour de 25%, la méthode est moins sensible au rayon.

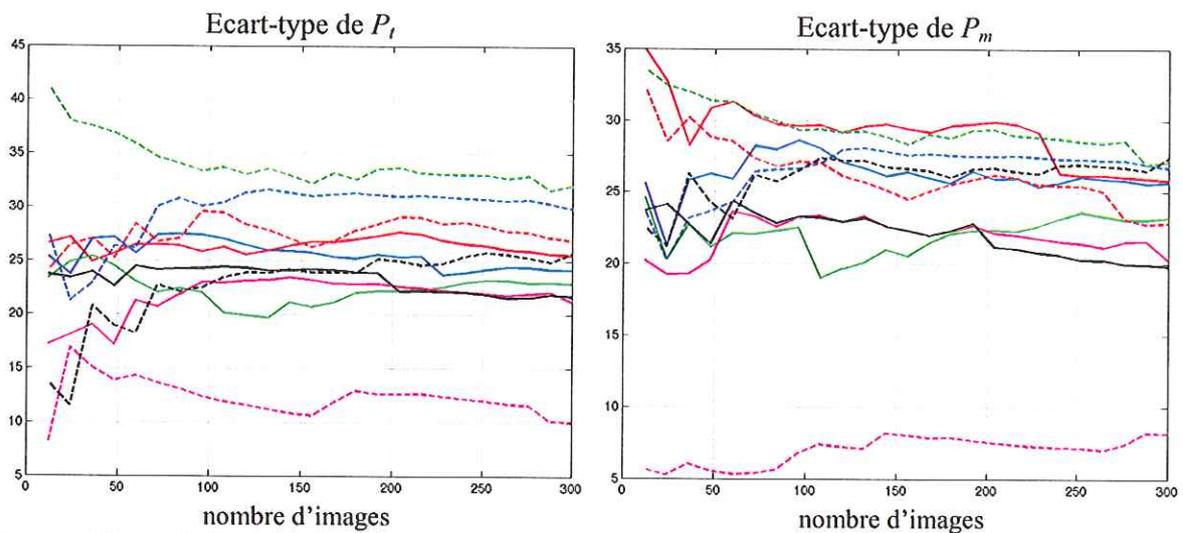


figure 3-12 : variation des écart-types de P_l et P_m en fonction de la taille de l'échantillon, pour les TH 2-D (trait plein) et 3-D (pointillés) et un contraste de 2. Légende des couleurs tableau 3-3

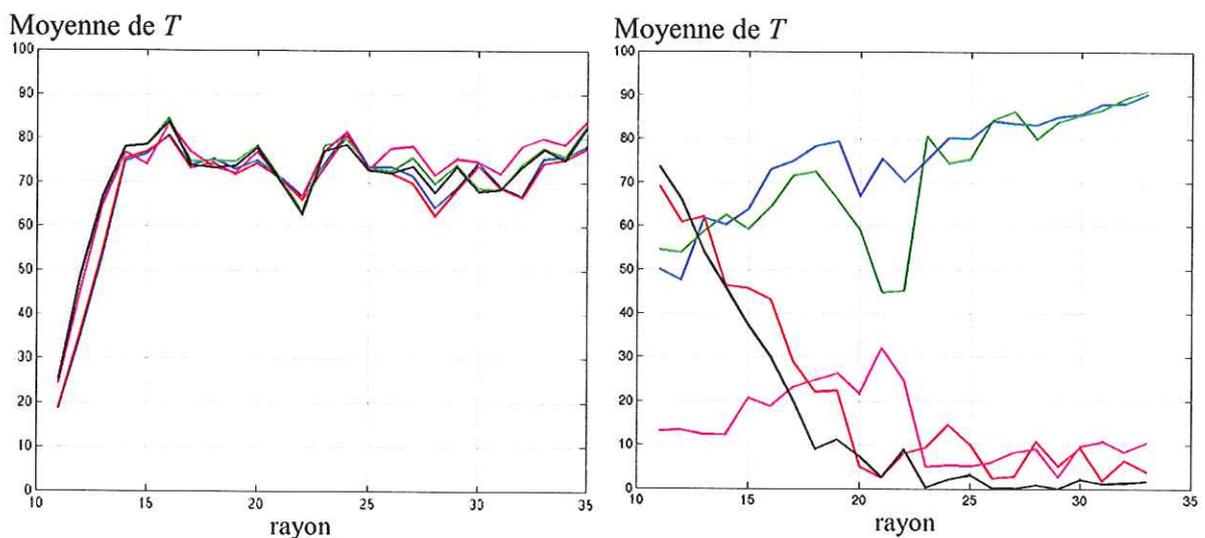


figure 3-13 : moyenne de T en fonction du rayon indépendamment du contraste, soit le calcul de la moyenne sur 36 images par rayon, pour la TH 2-D à gauche et 3-D à droite. Légende des couleurs tableau 3-3

<u>bleu</u> : accumulation binaire, sans normalisation	<u>rouge</u> : accumulation binaire, normalisation
<u>vert</u> : accumulation des gradients, sans normalisation	<u>rose</u> : accumulation des gradients, normalisation par le nombre de points participants
	<u>noir</u> : accumulation des gradients, normalisation par le rayon

tableau 3-3 : légende des couleurs pour les courbes de la figure 3-12 et figure 3-13

III.1.3. Résultats sur l'extraction des cuves par TH 3-D et 2-D

Nous présentons des exemples de résultats sur deux images réelles : vue 1, zone A (figure 1-20) et vue 2, zone B (figure 1-21). La TH 3-D sans normalisation donne de mauvais résultats sur les petites cuves (figure 3-14). Avec normalisation, les grandes cuves sont découpées en plusieurs petits cercles. La TH 2-D avec accumulation des gradients (figure 3-16) donne un résultat de meilleure qualité avec

une probabilité de détection de 85%, 6 fausses alarmes sur des petits bâtiments et 6 non détections (comparaison avec la réalité terrain, ANNEXE C). Cependant, ce résultat présente aussi des limitations :

- les seuils (seuil bas, seuil haut, seuil de décision) ont du être fixés manuellement,
- les petites cuves sont détectés avec un rayon légèrement trop grand et les grandes cuves avec un rayon parfois trop petit.

Le meilleur résultat obtenu sur la seconde vue de cuves en bande X est présenté sur la figure 3-15. Il est obtenu par TH 2-D binaire sans normalisation et choix manuel du seuil de sélection. La probabilité de détection est de 69% avec 18 non détections, 6 fausses alarmes sur des échos forts issus d'objets autres que des cuves, et 8 erreurs de position dues à la proximité des cuves ou à l'écho de sens négatif par rapport à la visée. On peut intuitivement penser que si on choisit plus spécifiquement les seuils, toutes les cuves pourront sans doute être détectées avec un accroissement des fausses alarmes.

Dans ces deux exemples, les erreurs résultent de l'ambiguïté due à la proximité des objets. L'imprécision sur la localisation du centre et sur l'estimation du rayon est induite par le bruit de corrélation mais aussi par le bruit du masque binaire (parties manquantes), du fait de l'épaisseur des échos forts et de l'imprécision des directions des gradients dû à l'effet ponctuel le long des structures brillantes.

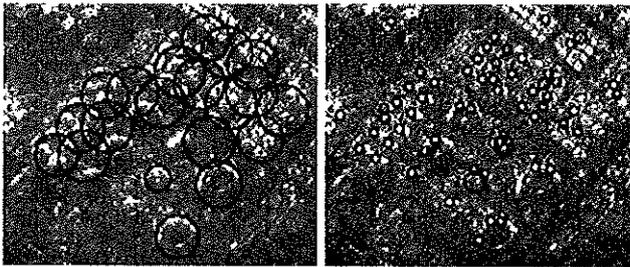


figure 3-14 : TH 3-D binaire sans normalisation (seuil de sélection manuel) et avec normalisation

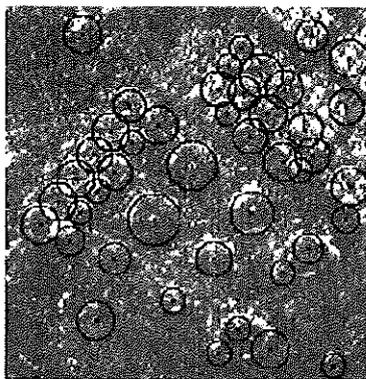


figure 3-16 : TH 2-D avec accumulation des gradients, normalisation par le nombre de points participants et seuils manuels

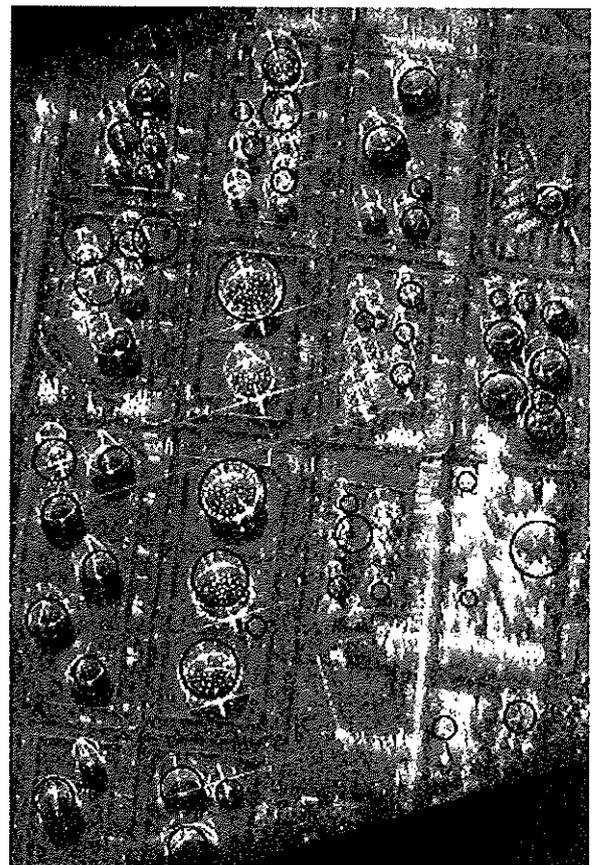


figure 3-15 : meilleur résultat par TH 2-D binaire sans normalisation (seuil de sélection manuel)

III.1.4. Conclusion sur la TH pour les cuves

Par estimation des performances à partir de simulations, nous avons montré que la TH 3-D est une méthode performante de détection si l'on connaît l'ordre de grandeur de la taille des objets. Dans ce cas, la probabilité de détection est supérieure à 80% en moyenne mais avec un écart-type autour de 30%. Dans le cas contraire, la TH 2-D semble plus robuste. La probabilité de détection est autour de 70% avec un écart-type autour de 25%. L'accumulation des gradients est légèrement préférable à l'accumulation binaire en 2-D.

Sur images réelles, le seuil de sélection apparaît déterminant puisqu'il influe sur l'ordre de détection. La mise à jour de la table peut donc être erronée si une mauvaise couronne est trouvée, induisant une propagation des erreurs. Les seuils bas et haut utilisés pour l'accumulation de réels sont également importants. En sélectionnant manuellement ces seuils, nous obtenons des résultats intéressants. Ceci nécessite néanmoins plusieurs essais et les seuils sont d'autant plus difficiles à fixer que la réponse radar des objets peut varier (cf. Chapitre 1).

La TH circulaire a donc de bonnes performances de détection mais est sensible aux seuils. Dans le paragraphe III.2, nous présentons donc une approche différente où le choix des seuils est remplacé par l'optimisation locale d'un critère qui prend en compte l'homogénéité du fond autour de l'écho double.

III.2. Extraction des cuves par optimisation d'un critère surfacique

L'objectif de cette approche est de traiter efficacement des scènes contenant des objets de taille variée sans être sensible à des seuils. Cette méthode vise également à interpréter localement les ambiguïtés liées à la proximité des objets et à exploiter plus avantageusement les différences radiométriques entre les échos doubles et le sol. En outre, au lieu d'extraire un demi-cercle épais, nous recherchons la meilleure demi-couronne englobant le groupe d'échos forts par optimisation d'un critère surfacique. Cette approche peut être vue comme une méthode de projection telle que la transformée de Radon. Nous nous inspirons aussi de la méthode de segmentation présentée dans [REFREGIE97].

Nous rappelons ces travaux sur la segmentation et détaillons ensuite notre méthode d'extraction de demi-couronnes. Nous proposons deux implémentations pour l'optimisation des paramètres de la forme : l'approche multi-résolution et les algorithmes génétiques. Comme pour la TH, les images simulées de demi-couronnes nous permettent d'estimer les performances de cette méthode. Enfin, nous concluons sur l'apport de cette approche à partir des résultats sur images réelles.

III.2.1. Segmentation d'images radar par optimisation d'un critère statistique

Dans [REFREGIE97] et [GERMAIN00], les auteurs proposent une méthode de segmentation des images radar par contours actifs. Partant d'une initialisation, les contours sont déplacés jusqu'à ce qu'un critère soit optimisé. Ce critère vise à maximiser la vraisemblance de la segmentation W . Notons :

- $S = \{s_i\}_{i \in [1, N]}$ la scène,
- $W = \{w_i\}_{i \in [1, N]}$ la partition en K régions avec $w_i \in [1, K]$

Le critère à optimiser s'écrit :
$$\arg \max_w P[S/W]$$

Avec l'hypothèse de pixels indépendants et après passage au logarithme, il devient :

$$\arg \max_w \sum_{i=1}^N \log f(s_i / w_i) \text{ avec } f(s_i / w_i) \text{ la densité de probabilité décrivant la région attribuée au pixel } i.$$

Les paramètres des distributions de chaque région sont estimés par MV à partition fixée. Considérant des régions homogènes de loi Gamma, les auteurs obtiennent :

$$\arg \min_w \sum_{k=1}^K N_{k/W} \log \mu_{k/W} \text{ avec } N_{k/W} \text{ le nombre de pixels dans la région } k \text{ et } \mu_{k/W} \text{ la moyenne.}$$

Pour la segmentation en deux régions, l'optimisation se déroule de la façon suivante [REFREGIE97] : à chaque itération, un nœud du contour est choisi aléatoirement et est déplacé de façon aléatoire sur un petit voisinage. Le critère est calculé pour cette nouvelle partition. Le déplacement est accepté si le critère est meilleur. L'algorithme converge lorsque le critère ne peut plus être amélioré.

Dans le cas de plus de deux régions, cette méthode est utilisée pour raffiner la position des contours obtenus par une méthode de segmentation [GERMAIN00]. Le contour est remplacé par une grille de nœuds. La convergence est atteinte en plusieurs passes au cours desquelles le nombre de nœuds est augmenté à la fin de chaque passe. Comme la déformation est locale à chaque itération, l'auteur propose de plus une méthode rapide de calcul du nouveau critère s'inspirant de la technique décrite dans [CHESNAUD99]. Elle consiste à passer du calcul sur une région à celui le long d'un contour. Pour cela, le critère doit être séparable.

III.2.2. Description de l'algorithme de reconnaissance de forme par optimisation d'un critère surfacique (AROCS)

En s'inspirant de l'approche précédente, nous proposons de reconnaître les demi-couronnes pour les cuves par optimisation d'un critère. Nous notons cette méthode, AROCS (Algorithme de Reconnaissance de formes par Optimisation d'un Critère Surfaccique). Les formes recherchées sont décrites par un vecteur de paramètres. A chaque itération, les paramètres sont modifiés et le critère est calculé sur la nouvelle forme. La convergence est atteinte lorsque la combinaison des paramètres permet d'optimiser le critère.

Si le contexte d'optimisation permet de s'affranchir du choix difficile du seuil de sélection dans la TH, la méthode nécessite une initialisation, un critère robuste aux irrégularités le long des structures brillantes et une technique d'optimisation des paramètres. Les deux premiers points sont traités dans cette section. Le dernier est abordé la section III.2.3.

III.2.2.1. Initialisation

Les maxima locaux servent d'initialisation pour les cuves. La détection est contrainte par le masque binaire et un point est sélectionné si son amplitude est supérieure à $\mu + 3\sigma$ pour μ et σ calculés

globalement puis à $\mu+3\sigma$ pour μ et σ calculés localement. Ceci nous permet d'obtenir facilement un point d'accès sur chaque écho double mais laisse des fausses alarmes. Deux cas de fausses alarmes surviennent : sur les échos forts ponctuels et dans les amas d'échos forts. Les fausses alarmes dues aux échos forts ponctuels pourront être supprimées lors de la reconnaissance de forme en fixant un rayon minimal et en ajoutant une contrainte sur le pourcentage minimal d'échos forts que doit contenir la forme. Les fausses alarmes sur les amas d'échos forts restent gênantes mais seront en partie supprimées dans le cas stéréoscopique. Des points sont également détectés sur les objets différents des cuves, par exemple les bâtiments. Cette question est discutée dans la section V de ce chapitre.

III.2.2.2. Principe de l'AROCs

La couronne est décrite par quatre paramètres : positions en ligne et en colonne du centre (i_0, j_0) , rayon extérieur r et épaisseur e . A partir de paramètres par défaut et d'un point d'accès, la couronne est modifiée jusqu'à convergence du critère (figure 3-17). Le critère est calculé sur la forme et sur une boîte englobante, que l'on dénomme fond (figure 3-18). La prise en compte du fond est favorable uniquement s'il a des caractéristiques statistiques très différentes de la forme. Dans ce cas, l'approche par reconnaissance de forme est très avantageuse par rapport aux techniques d'accumulation car elle permet d'exploiter la différence radiométrique entre un fond foncé et homogène et une forme brillante et fortement hétérogène.

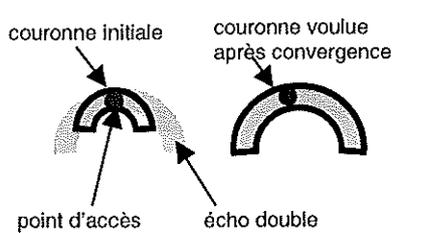


figure 3-17 : couronne initiale et couronne voulue à la convergence

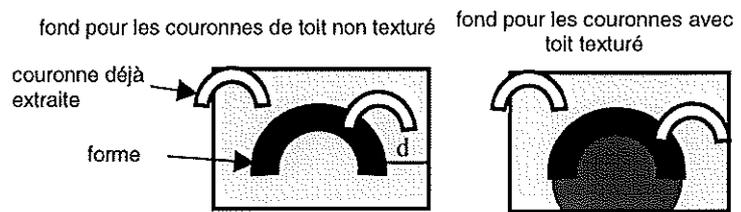


figure 3-18 : pixels participant au fond en gris clair et à la forme en noir

Comme le fond contient souvent des échos forts issus d'objets voisins ou du toit, nous choisissons un fond privé du toit potentiel et des objets déjà extraits. La boîte englobante peut être fixe pendant l'optimisation ou varier avec les paramètres. Une fenêtre fixe doit être assez grande pour englober la plus grande forme possible de l'espace de recherche. Si les objets sont proches, le fond va alors contenir de nombreux échos forts. Les propriétés radiométriques du fond ne seront pas assez différentes de celles de la forme et l'algorithme va échouer. Nous utilisons donc des boîtes variables, définies par un rectangle dont les bords sont écartés d'une distance d de la forme testée. Nous prenons $d = 10$ pixels.

De plus, afin de réduire l'influence de l'irrégularité des intensités le long de l'écho fort, le critère pour les grandes formes est calculé sur l'image réduite d'un facteur deux. Pour cela, l'espace des rayons possibles est divisé en deux cas : petits objets et grands objets.

III.2.2.3. Définition de critères

On attribue l'indice 1 à la forme et 2 au fond. Nous proposons de traduire les différences de propriétés entre la forme et le fond via :

- les statistiques d'ordre 1 et 2 : moyenne, variance, coefficient de variation,
- la densité d'échos forts,
- les fonctions d'appartenance à la classe du sol ou des échos forts.

III.2.2.3.1. Critères basés sur les statistiques d'ordre 1 et 2

En se limitant à l'ordre 2, on peut définir les critères à maximiser suivants :

- sur les moyennes : $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$
 $R\mu = \mu_1 / \mu_2$
- sur les écart-types : $R\sigma = \sigma_1 / \sigma_2$
- sur les coefficients de variation : $R\gamma = \gamma_1 / \gamma_2$ avec $\gamma_1 = \sigma_1 / \mu_1$ et $\gamma_2 = \sigma_2 / \mu_2$

Nous définissons également le critère qui maximise la différence d'intensités et l'homogénéité dans le fond :

$$\Delta\mu / \gamma_2$$

La combinaison des deux critères suivants sera aussi étudiée :

$$R\sigma \cdot \Delta\mu / \gamma_2$$

III.2.2.3.2. Critères mesurant la densité d'échos forts

La densité d'échos forts issus des structures peut être calculée de deux façons : sur le masque binaire ou par un critère statistique.

A partir du masque binaire, le critère doit favoriser les configurations où la forme contient un maximum d'échos forts, tandis que le fond en contient un minimum. On note :

- N_1 le nombre de pixels dans la forme et N_2 dans le fond,
- $(w_i)_i$ le masque binaire, $w_i = 1$ si écho fort, 0 sinon,
- $CB1 = \frac{1}{N_1} \sum_{i \in 1} w_i$ et $CB2 = \frac{1}{N_2} \sum_{i \in 2} (1 - w_i)$.

Nous définissons alors les critères de la forme :

$$CB1 + CB2$$

$$CB1 \cdot CB2$$

Nous nous sommes aussi intéressés au filtre *ffmax* proposé dans [GOUINAUD96]. Ce filtre sert à mesurer la densité des échos forts dans un voisinage en étudiant la queue de l'histogramme. Pour cela, l'histogramme sur la zone est parcouru à partir des valeurs d'intensités les plus élevées. Le filtre renvoie l'indice dans l'histogramme au bout duquel le cumul atteint la valeur maximale de l'histogramme :

$$ffmax = S \text{ tel que } \sum_{i=S}^{\max} f_i > \max\{f_i\}, \text{ avec } f \text{ l'histogramme}$$

Soient *ffmax*₁, la réponse de ce filtre dans la forme et *ffmax*₂ dans le fond. Nous définissons le critère suivant à partir de ce filtre :

$$Rffmax = ffmax_1 / ffmax_2$$

Nous testerons également le critère combiné avec le critère statistique précédent :

$$R_{ffmax} \cdot \Delta\mu / \gamma_2$$

III.2.2.3.3. Critères reposant sur des fonctions d'appartenance

Le fond et la forme sont distribués selon deux lois différentes ou de paramètres différents. Nous avons vu que les amplitudes suivent une loi Lognormale, de façon approximative pour la classe des échos forts (cf. chapitre 1, II-2). Le critère statistique fondé sur les rapports de vraisemblance peut être utilisé.

La figure 3-19 (a) représente les histogrammes normalisés pour la classe des échos forts et la classe sol. On constate que le rapport des vraisemblances est favorable à la classe sol pour les pixels dont l'amplitude est inférieure à environ 0.8. Une part importante de pixels de la classe des échos forts ont cependant une telle amplitude. Ce critère risque donc d'aboutir à un taux d'erreurs important pour la classification des échos forts. Nous avons alors recours à un critère moins fort, où les histogrammes sont normalisés par leur valeur maximale. Ceci a pour effet de diminuer le seuil de classification. Sur la figure 3-19 (b), il vaut environ 0.5. Ces courbes ne correspondant plus à des densités de probabilités, nous parlons de fonctions d'appartenance. Afin de rendre ces fonctions plus discriminantes, elles sont modifiées avant le mode de l'histogramme pour le sol et après pour les échos forts.

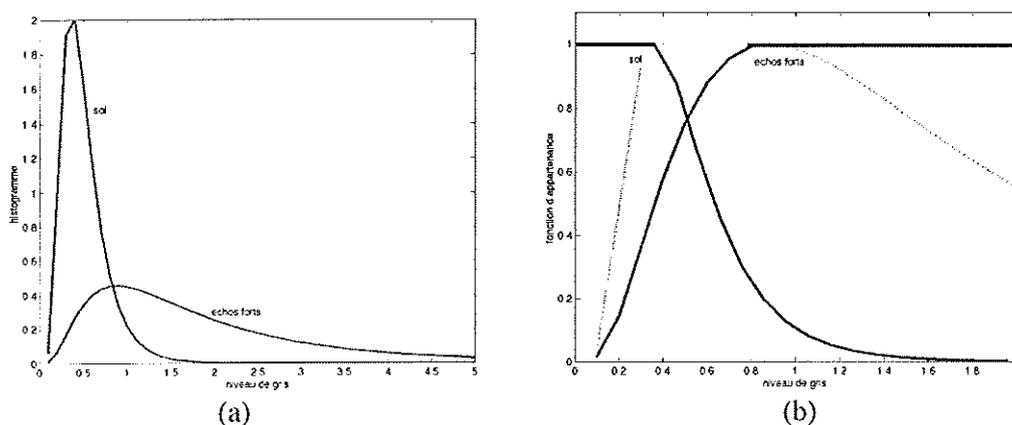


figure 3-19 : histogrammes normalisés des classes sol et échos forts et fonctions d'appartenance

On note :

- μ_1 et σ_1 (resp. μ_2 et σ_2) les paramètres de la loi Lognormale décrivant la classe des échos forts (resp. du sol). Ces paramètres sont estimés une seule fois en début de traitement sur l'image classifiée,
- F_1 (resp. F_2) la fonction d'appartenance à la classe des échos forts (resp. du sol).

On définit un critère moyen mesurant la proportion de pixels dans la forme qui sont des échos forts et n'appartiennent pas au sol :

$$CF1 = \frac{1}{N_1} \sum_{i \in I} F_1(i) \cdot (1 - F_2(i))$$

On définit de même le critère moyen mesurant la proportion de pixels dans le fond appartenant au sol et qui ne sont pas des échos forts :

$$CF2 = \frac{1}{N_2} \sum_{i \in 2} F_2(i) \cdot (1 - F_1(i))$$

On peut observer que les deux fonctions normalisées ne sont pas très discriminantes car les deux courbes se croisent fortement (figure 3-19 (b)). Nous testerons tout de même le critère suivant :

$$CF1 + CF2$$

III.2.2.4. Contraintes et gestion des ambiguïtés

III.2.2.4.1. Contraintes

Quatre contraintes radiométriques et géométriques sont utilisées lors de l'optimisation du critère :

- la proportion de pixels du masque binaire dans la forme est supérieure à 50%,
- le point d'accès appartient à la demi-couronne,
- le centre est aligné avec le point d'accès dans la direction de visée dans le cas du Doppler nul. Nous sommes dans le cas de Doppler quasiment nuls, cette condition est donc approximative,
- dans le cas de plusieurs arcs pour une même cuve, les centres sont alignés dans la direction de visée et les rayons sont similaires.

Les formes qui ne respectent pas les deux premières contraintes sont simplement rejetées. La troisième contrainte résulte de l'observation qu'un point d'accès est généralement détecté sur le pixel de l'écho double de distance minimale dans l'image radar. En effet, à cette position et pour le cas d'un Doppler nul, l'effet dièdre induit un écho très fort. En pratique, nous recherchons les centres dans une bande large de quelques pixels de part et d'autre du point d'accès et dirigée suivant la direction de visée (figure 3-20).

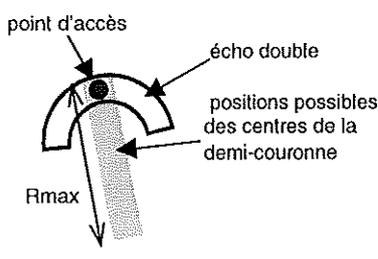


figure 3-20 : zone des centres possibles pour un écho double de sens positif par rapport à la direction de visée

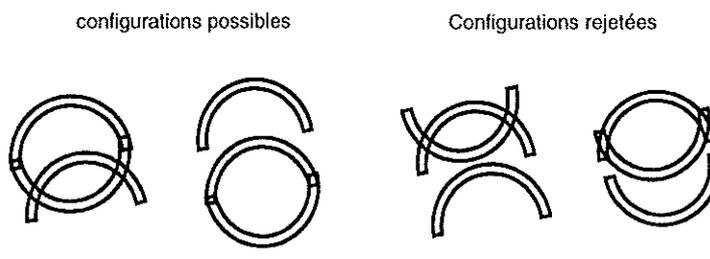


figure 3-21 : configurations possibles et rejetées dans le cas d'arcs de sens positif et négatif par rapport à la direction de visée

La quatrième contrainte est ajoutée pour les images en bande X où plusieurs arcs sont repérables pour une même cuve. Ces arcs sont espacés au maximum d'une distance équivalente au diamètre d'un arc de sens positif s'ils sont de sens opposés et proportionnelle à la hauteur s'ils sont de même sens. Pour prendre en compte ce cas, l'association de plusieurs arcs détectés est possible et nous procédons de la façon suivante :

- les points d'accès sont traités dans leur ordre d'apparition dans l'image par rapport à la direction de visée,
- traitement d'un point d'accès P :
 - test s'il est potentiellement issu de la même cuve qu'une demi-couronne déjà extraite à partir d'un point Q : points P et Q alignés dans la direction de visée et distance compatible avec les conditions de hauteur et de diamètre,
 - si oui,
 - recherche pour P de la demi-couronne de sens positif et de sens négatif,
 - affinage de la reconnaissance pour obtenir deux demi-couronnes passant par P d'une part et Q d'autre part, de rayons similaires. Cet affinage concerne aussi les autres demi-couronnes associées à l'objet cuve de Q ,
 - si la configuration résultante est possible (figure 3-21), P est ajouté à l'objet cuve de Q ,
 - sinon, recherche de la meilleure demi-couronne de sens positif.

Les configurations possibles correspondent à avoir un écho double ou l'écho du bord du toit de sens positif et au maximum un écho de sens négatif correspondant au toit, qui peut être flottant. Sa position dans l'image est donc située entre l'écho du bord du toit et l'écho double. Les configurations rejetées sont celles pour lesquelles l'altitude correspondante à l'écho de sens négatif est supérieure à celle du toit ou inférieure à celle du sol (écho en avant de l'écho du bord du toit ou en arrière de l'écho double). Comme on ne sait pas *a priori* quel écho correspond au toit, la troisième configuration sur la figure 3-21 est possible si l'écho du bord du toit n'est pas détecté et qu'un écho triple a lieu. Cependant nous supposons que les échos triples, en général faibles sur nos images, ne sont pas détectés. Cette configuration est donc rejetée. On écarte également les configurations à plusieurs échos de sens négatif, qui peuvent aussi avoir lieu.

III.2.2.4.2. Ambiguïtés

A partir d'un point, il arrive souvent que la demi-couronne trouvée englobe d'autres points d'accès. Dans ce cas, il y a ambiguïté car on ne sait pas si les autres points sont issus du même objet. Prenons l'exemple d'une demi-couronne trouvée à partir du point P et qui englobe le point Q . Cette forme est acceptée si sa valeur de critère est meilleure que la moyenne des valeurs de critère pour la demi-couronne issue de P et ne contenant pas Q et celle issue de Q et ne contenant pas P .

III.2.3. Méthode d'optimisation des paramètres

Contrairement aux techniques d'accumulation comme la transformée de Hough, la participation d'un pixel peut varier en fonction de la forme selon le critère choisi. Ceci est à la fois un avantage et un inconvénient. L'avantage est que le pixel n'est pas considéré individuellement mais selon le contexte. L'inconvénient est que toutes les combinaisons de paramètres devraient être testées. Le temps de traitement s'accroît rapidement avec le nombre de paramètres et l'étendue des domaines de recherche pour chaque paramètre.

Afin de construire une méthode stable qui s'adapte à tous nos critères, nous proposons une méthode d'optimisation exhaustive multi-résolution et une méthode stochastique, un algorithme génétique, pour trouver la meilleure demi-couronne à partir d'un point d'accès. Des rappels sur les algorithmes génétiques sont donnés puis la mise en œuvre est présentée.

III.2.3.1. Discussion

Une approche multi-résolution a été réalisée. La méthode d'optimisation est exhaustive mais les paramètres sont recherchés en plusieurs passes avec des pas de discrétisation dégressifs :

- variation des paramètres avec un pas de 3,
- variation des paramètres avec un pas de 1 sur des domaines restreints.

Les critères étant fortement multi-modaux, cette approche peut facilement échouer en convergeant dès la première passe vers un maximum local.

Nous sommes face à un problème d'optimisation combinatoire - un coût est minimisé en testant différentes combinaisons de paramètres discrétisés - ou d'affectation sous contraintes - on cherche à affecter des valeurs aux paramètres sous deux contraintes qui sont de minimiser un coût et de respecter le domaine de recherche. Le problème s'écrit donc :

$$\begin{cases} \min C(X) \\ \forall i, x_i \in D_i \end{cases}$$

avec :

- C la fonction coût à optimiser,
- $X = (x_i)_{i \in [1, N_p]}$ le vecteur des paramètres,
- $D = (D_i)_{i \in [1, N_p]}$ le domaine des solutions,
- N_p étant le nombre de paramètres,

Vu sous cette forme, deux types de méthodes de résolution existent : les méthodes exactes et les méthodes approchées (pour plus de détails, voir par exemple [HAO99]). Nous nous intéressons aux méthodes approchées qui explorent une faible part du domaine des solutions. Parmi ces méthodes, on trouve principalement :

- les méthodes gloutonnes. Elles font partie des méthodes de construction. Des heuristiques sont choisies pour décider quel paramètre est affecté et à quelle valeur. Dans la méthode gloutonne, les paramètres déjà affectés ne bougent pas mais une variante avec retour arrière existe,
- l'amélioration itérative, ou recherche locale. C'est la méthode de voisinage de base. Elle consiste simplement à garder à chaque itération la meilleure solution contenue dans le voisinage de la solution courante,
- les méthodes stochastiques, dites métaheuristiques. Elles incluent des méthodes de voisinage (recuit simulé, recherche tabou), les algorithmes évolutifs (algorithme génétique, programmation évolutive, stratégies d'évolution) et les méthodes hybrides (mélange de recherche locale et de recombinaison par techniques évolutives).

Dans notre cas, la fonction est fortement multi-modale et peut varier brusquement avec la modification élémentaire d'un paramètre. Les métaheuristiques sont des outils appropriés à ce genre de problème car ils sont fortement modulables. Leur performance n'est souvent pas prévisible mais ils se sont révélés efficaces en particulier pour les problèmes de grande taille [HERVET00].

Le recuit simulé [KIRKPATR83] et la recherche tabou [GLOVER89] sont des méthodes locales, nécessitant une définition du voisinage et un parcours du voisinage d'une solution. Le voisinage peut être vu comme un graphe orienté et la méthode comme le parcours d'un graphe. Ces méthodes dépendent donc de la structure du graphe (définition du voisinage) et de la stratégie de parcours du graphe (choix de la meilleure solution dans le voisinage).

Les algorithmes évolutifs reposent sur la définition d'une population d'individus et son évolution par recombinaison entre individus selon la théorie Darwinienne : les individus les mieux adaptés à leur milieu survivent et se reproduisent. Algorithmes évolutifs, stratégies d'évolution et algorithmes génétiques se différencient par les méthodes de codage des individus et de recombinaison (croisements, mutations).

L'efficacité d'une métaheuristique, en terme d'exploitation (mémorisation de l'histoire de la recherche en tabou, recombinaison des parents en évolutif) et d'exploration (diversification en tabou, mutation en génétique), dépend de la bonne adaptation des heuristiques. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux algorithmes génétiques (AG) pour deux raisons :

- ils sont fortement parallélisables : dans [LERMAN95], la technique de parallélisation permet de diminuer le temps d'exécution presque linéairement avec le nombre de processeurs,
- ils sont adaptés aux critères multi-modaux de par le mécanisme de convergence (voir section III.2.3.2.6) : les solutions de forte potentialité sont favorisées si elles sont appuyées par de nombreux individus.

III.2.3.2. Les algorithmes génétiques (AG)

III.2.3.2.1. Domaine d'applications en traitement d'images

Les AG sont utilisés pour des applications variées telles que :

- la mise en correspondance d'images stéréoscopiques : mise en correspondance dense [SAITO95] et mise en correspondance de primitives [GOULERMA01],
- la fusion d'images [ROSENBER01],
- la reconnaissance de formes : formes simples (cercles, rectangles [LUTTON93]) ou complexes (véhicules [TOET95]),
- la détection des primitives : segments, cercles, rectangles, [LUTTON93].

Les travaux de Lutton [LUTTON93] s'inscrivent dans le contexte de reconnaissance et de détection puisque les images traitées peuvent contenir plusieurs primitives et l'initialisation est aléatoire. L'auteur conclut que l'AG complète avec succès la transformée de Hough pour les primitives de plus de 3 paramètres.

III.2.3.2.2. Principe général

Les AG ont été introduits pour l'optimisation stochastique de fonctions posant des problèmes de continuité et de différentiabilité ([HOLLAND75], [GOLDBERG89]). Ils permettent d'étudier en parallèle plusieurs zones du domaine de recherche en faisant évoluer simultanément un ensemble de solutions potentielles, les individus. Ils s'adaptent ainsi au cas multi-modal. On définit une population

de N individus ou chromosomes $(I_n)_{n \in [1, N]}$. Un individu est décrit par K gènes : $I_n = (p_k^{(n)})_{k \in [1, K]}$. D'après [HOUCK95], le codage des gènes est initialement binaire (AG Canonique ou AGC) mais le codage en nombres réels se révèle plus efficace en terme de précision des résultats et de rapidité car l'étape de codage/décodage est supprimée.

Les AG se décomposent en trois étapes : initialisation, génération de la nouvelle population et arrêt (figure 3-22). La population initiale est construite par tirage aléatoire des K gènes pour chaque individu. Lors du passage de la génération n à la génération $n+1$, N individus sont sélectionnés pour participer à la population suivante. Cette sélection doit permettre la convergence tout en maintenant la diversité génétique de la population. Les chromosomes sont sélectionnés à partir d'un critère C , appelé fonction d'évaluation ou d'adaptation. Les individus sélectionnés ou parents créent des enfants par opérations génétiques (croisements et mutations). La nouvelle population de N individus est composée soit des enfants, soit des meilleurs individus entre enfants et parents, soit des parents et d'enfants remplaçant les moins bons parents. L'arrêt est assuré par un nombre de générations maximal ou lorsque la diversité devient faible.

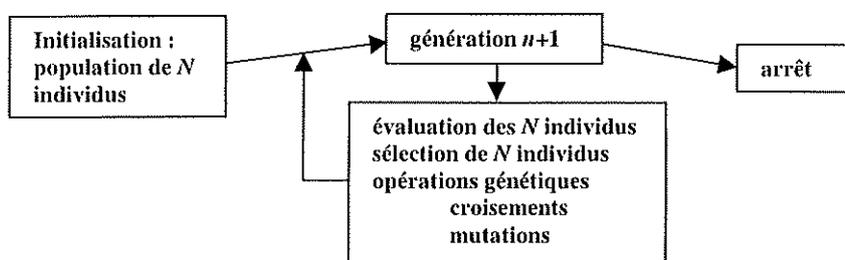


figure 3-22 : fonctionnement de l'AG

Ce formalisme permet aussi de détecter plusieurs maxima simultanément par la technique du partage [LUTTON93]. Cette technique favorise la survie de plusieurs pics. Une restriction peut y être ajoutée pour que des individus d'espèces différentes ne puissent pas interagir entre eux.

III.2.3.2.3. Sélection

Lors de cette étape, un individu peut être choisi plusieurs fois. Il est sélectionné suivant sa valeur d'adaptation ou suivant une probabilité proportionnelle à cette valeur. Il existe quatre méthodes principales de sélection : la roulette, le tournoi, la sélection par rang et la stratégie élitiste.

- la roulette consiste à attribuer à un individu une portion de la roue, proportionnelle à sa probabilité d'adaptation. N tirages aléatoires sur la roue permettent ensuite de constituer la nouvelle population. La probabilité d'un individu est égale à sa valeur d'adaptation normalisée par l'adaptation totale de la population. Cette méthode peut favoriser l'apparition d'un super-individu,
- le tournoi consiste à choisir aléatoirement p individus et à ne garder que le meilleur. L'opération est répétée jusqu'à la sélection des N individus. Le paramètre p ou pression de sélection correspond à la probabilité d'occurrences du meilleur individu dans la nouvelle population. Elle détermine donc la rapidité de convergence vers un individu,
- dans la méthode par rang, la probabilité de sélection d'un individu dépend de son rang après classement des individus dans l'ordre croissant des valeurs d'adaptation. L'avantage est ici que la sélection ne dépend pas directement de ces valeurs,

- la stratégie élitiste consiste à remplacer les moins bons individus de la nouvelle population par les meilleurs de la population précédente. Le meilleur individu est ainsi reproduit de façon certaine.

III.2.3.2.4. Croisement

L'opération de croisement est réalisée entre deux parents choisis aléatoirement. Les deux parents I_1 et I_2 donnent lieu à deux enfants $I_1' = (p_k^{(1)})_{k \in [1, K]}$ et $I_2' = (p_k^{(2)})_{k \in [1, K]}$. D'après [HOUCK95], trois types de croisement sont utilisés dans le cas du codage en réels :

- Croisement simple : une position k sur le chromosome est choisie aléatoirement. Les gènes entre les deux parents sont échangés selon :

$$p_t^{(1)'} = \begin{cases} p_t^{(1)} & \text{si } t < k \\ p_t^{(2)} & \text{si } t \geq k \end{cases} \quad \text{et} \quad p_t^{(2)'} = \begin{cases} p_t^{(2)} & \text{si } t < k \\ p_t^{(1)} & \text{si } t \geq k \end{cases}$$

- Croisement arithmétique : le croisement est effectué sur le gène k choisi aléatoirement. Soit t entre 0 et 1, si le croisement est acceptable, les enfants ont pour nouveau gène :

$$p_k^{(1)'} = t.p_k^{(1)} + (1-t).p_k^{(2)} \quad \text{et} \quad p_k^{(2)'} = t.p_k^{(2)} + (1-t).p_k^{(1)}$$

- Croisement heuristique : le croisement est effectué sur le gène k choisi aléatoirement. Soit t entre 0 et 1, si le croisement est acceptable, les enfants ont pour nouveau gène :

$$\text{Pour } f(I_1) > f(I_2), \quad \begin{cases} p_k^{(1)'} = p_k^{(1)} + t.(p_k^{(2)} - p_k^{(1)}) \\ p_k^{(2)'} = p_k^{(1)} \end{cases}$$

III.2.3.2.5. Mutation

Trois types de mutation sont rapportés dans [HOUCK95]. Cette opération est appliquée sur un parent I_1 choisi aléatoirement et sur son gène k sélectionné aléatoirement :

- Mutation uniforme : la valeur $p_k^{(1)}$ est modifiée par tirage aléatoire dans le domaine de variation du gène k , $[\min_k, \max_k]$.
- Mutation par bornes : la borne supérieure ou inférieure du domaine de variation du gène k est affectée en $p_k^{(1)}$. Si $p_k^{(1)} < m_k$, $p_k^{(1)} = \max_k$, sinon $p_k^{(1)} = \min_k$, avec m_k la valeur médiane de $[\min_k, \max_k]$
- Mutation non uniforme : soient t_1 et t_2 entre 0 et 1, la valeur $p_k^{(1)}$ devient :

$$p_k^{(1)'} = \begin{cases} p_k^{(1)} + (\max_k - p_k^{(1)})t_2.(1-n/NITER)^b & \text{si } t_1 \leq 0.5 \\ p_k^{(1)} + (p_k^{(1)} - \min_k)t_2.(1-n/NITER)^b & \text{sinon} \end{cases}$$

avec b un paramètre de forme ($b=2$ dans la suite) et $NITER$ le nombre maximal de générations.

III.2.3.2.6. Convergence

Holland donne en 1975 une explication sur le fonctionnement de l'AGC en introduisant la notion de 'schemata'. Un 'schema' représente une configuration générique du codage binaire d'un individu,

par exemple le codage sur 7 bits suivant : 01XX0X1 est un 'schema' d'ordre 4, avec 4 éléments instantiés, et de longueur 7, égale à la distance entre les premier et dernier gènes instantiés. Le 'schema' correspond donc à une région de l'espace des solutions. Faisant l'hypothèse qu'un bon individu contient de bons 'schemata', le théorème des 'schemata' stipule qu'au cours des générations, les meilleurs 'schemata' se reproduisent davantage que les autres, donnant lieu à des individus meilleurs avec de meilleurs 'schemata'. Ce théorème est traduit par une inégalité qui est mise sous la forme suivante dans [LERMAN95] :

$$E(|S \cap P_{n+1}|) \geq |S \cap P_n| \frac{u(P_n, S)}{u(P_n, B)} (1 - c(P_n, S) - m(P_n, S))$$

Avec :

- S un 'schema',
- E représente l'espérance,
- P_n la population à la génération n , de longueur N ,
- $c(P_n, S)$ (resp. $m(P_n, S)$) la probabilité que S soit détruit dans la population suivante par croisement (resp. par mutation),
- B est l'ensemble des solutions : arrangement de 0 et de 1 de longueur N ,
- $S \cap P_n$ est l'ensemble des individus contenant le 'schema' S , de cardinal, $|S \cap P_n|$,
- u est la fonction utilité définie par : $u(P, S) = \frac{1}{|P \cap S|} \sum_{w \in P \cap S} C(w)$

Cette inégalité traduit que si un 'schema' a une utilité supérieure à l'utilité moyenne dans la population, sa présence dans la population suivante augmente à condition qu'il ne disparaisse pas lors des opérations génétiques. Des études sur la convergence de l'AGC vers l'optimum global sont menées dans [LERMAN95].

D'après [BEASLEY93], Goldberg démontre que l'AG fonctionne bien s'il parvient à former des 'building blocks' qui sont des 'schemata' de petites tailles de fort potentiel. Il donne donc deux recommandations : les gènes qui interagissent entre eux doivent être proches sur le chromosome tandis que le codage doit permettre de limiter les interactions entre gènes afin que l'adaptation ne varie pas fortement entre individus voisins.

III.2.3.2.7. Algorithme sous contraintes

En introduisant des contraintes, la difficulté est de continuer à explorer tout l'espace de recherche. Plusieurs techniques existent [BENHAMID00] :

- l'adaptation d'un individu est pénalisée pour chaque contrainte non respectée. Si la pénalité est trop forte, l'AG converge prématurément. Trop faible, on risque d'aboutir à un individu impossible. C'est pourquoi cette pénalité peut être pondérée par l'indice de la génération n .
- les individus irréalisables sont modifiés pour devenir valides lors d'une phase de réparation. Cette opération peut cependant être difficile à concevoir et est lourde en temps de calcul,
- les opérateurs génétiques sont construits selon le problème pour ne générer que des individus possibles, ce qui est parfois difficile à réaliser,
- le problème avec contraintes est ramené à un problème multi-critères sans contraintes. Ce procédé demande plus de calculs et les critères ne doivent être ni trop ni pas assez pénalisants.

III.2.3.2.8. Discussion sur les paramètres à fixer

Les paramètres à choisir sont :

- la taille de la population : N ,
- le taux de croisement : τ_c ,
- le taux de mutation : τ_m ,
- la pression de sélection : p ,
- le nombre maximal de générations : $NITER$.

Ces paramètres contrôlent l'efficacité de l'AG. Une diversité suffisante doit être maintenue pour éviter une convergence prématurée vers un maximum local. Ce phénomène se produit si la population comporte peu d'individus, si la pression de sélection est grande ou si les taux de croisement et de mutation sont faibles. Au contraire, si la pression de sélection est petite, les taux de croisement et de mutation trop grands, la diversité reste importante et l'AG est totalement aléatoire. Il y a dérive génétique.

La taille de la population est généralement prise égale à la longueur du codage ([LERMAN95], [DEB98]) :

$$l = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(\frac{\max_k - \min_k + 1}{\varepsilon_k} \right) \text{ en binaire et } l = \sum_{k=1}^K \left(\frac{\max_k - \min_k + 1}{\varepsilon_k} \right) \text{ en réel, avec } \varepsilon_k \text{ la précision voulue}$$

La convergence est meilleure lorsque la taille de population augmente et si le nombre de générations est suffisant [DEB98].

Le taux de mutation est très faible (entre 0.1// et // [DEB98]) et le taux de croisement est généralement choisi supérieur à 50%. La pression de sélection doit alors être compatible avec le théorème des '*schemata*'. Une expression simplifiée de ce théorème est donnée dans [HARIK99] :

$$p(1 - \tau_c) > 1$$

Certains travaux concernent l'adaptation des paramètres N , τ_c et τ_m au cours de l'AG : diminution de τ_m au cours des générations [LUTTON95], évolution de plusieurs populations de taille différente simultanément [HARIK99].

Le nombre maximal de générations peut être décidé d'après un pourcentage de l'espace des solutions déjà exploré ou lorsque tous les gènes ont convergé, c'est-à-dire que pour chaque gène, la diversité dans la population est faible [DEB98] ou encore lorsque l'adaptation moyenne de la population tend vers la meilleure adaptation [BEASLEY93].

III.2.3.3. Mise en œuvre de l'AG pour la reconnaissance des demi-couronnes

L'AG implémenté utilise une sélection par tournoi, les trois méthodes de croisement et les trois méthodes de mutation. Le codage des variables est réel. Nous choisissons comme paramètres de l'AG :

- $N = l$ (longueur de codage d'un individu),
- $\tau_c = 80\%$,
- $\tau_m = 3/N \%$, pour avoir exactement une mutation de chaque type.
- $p = 10$.

Nous proposons un AG hybride en trois étapes :

1. tirage aléatoire de la population initiale. En prenant en compte la contrainte sur le centre, les domaines de variation des paramètres sont :

$$\begin{aligned} & [R_{MIN}, R_{MAX}] \text{ pour } r, \\ & [1, r] \text{ pour } e, \\ & \pm \varepsilon \text{ autour de la direction de visée à partir du point d'accès pour le centre } (i_0, j_0). \end{aligned}$$

La longueur de codage de l'individu est majorée par $2(R_{MAX} - R_{MIN} + 1) + 2\varepsilon + 1$. Sur nos images, les rayons varient au maximum entre 5 et 45 pixels et on prend $\varepsilon = 5$. La longueur de codage serait donc 93. La taille de la population est par conséquent autour de 100 individus.

2. optimisation des paramètres i_0, j_0, r et e par AG. Le croisement entre individus de rayons très différents engendre des enfants irréalisables, ce qui risque de produire de mauvaises populations. De plus, il est ressorti que les petites couronnes ont toujours une adaptation forte. Il peut donc arriver que l'AG converge rapidement vers une petite couronne. Nous proposons donc une variante avec une population divisée en trois sous-populations : petits rayons, rayons intermédiaires et grands rayons. Contrairement aux AG de type symbiotique, les sous-populations ne communiquent pas entre elles. Nous notons cette variante AG2. Les domaines respectifs de variation pour r sont alors :

$$\begin{aligned} & [R_{MIN}, R_{MIN} + dR + 2] \\ & [R_{MIN} + dR - 2, R_{MAX} - dR + 2] \\ & [R_{MAX} - dR - 2, R_{MAX}] \\ & \text{avec } dR = (R_{MAX} - R_{MIN} + 1) / 3 \end{aligned}$$

Dans l'AG2, chaque sous-population a des individus codés sur une longueur approximative de $2(dR + 3) + 2\varepsilon + 1$, soit dans notre cas environ 45.

Pour éviter d'avoir des populations avec de nombreux individus irréalisables à cause des contraintes, celles-ci ne sont appliquées qu'à la fin du processus. Ceci signifie qu'il est possible de converger vers une forme qui sera finalement rejetée. Lors de l'optimisation, les contraintes sont cependant prises en compte par des pénalisations qui défavorisent les individus mal adaptés. La contrainte radiométrique est supposée être déjà traitée par le biais du critère optimisé. Les deux contraintes géométriques, point d'accès dans la forme et centre situé dans la direction de visée, sont introduites en pondérant l'adaptation par l'inverse de 1 plus la somme de deux distances : celle du point d'accès à la forme et celle du centre à la bande des centres possibles.

3. affinage local de la forme. A partir de la solution issue de l'AG ou de l'AG2, une boucle sur les paramètres pour de faibles plages de variations permet d'aboutir au maximum autour du pic trouvé à l'étape précédente. Ces plages de variations sont fixées pour tous les paramètres à ± 2 pixels.

III.2.4. Etudes des performances

Nous effectuons l'analyse de performance de l'AROCS de la même façon que pour la TH circulaire, c'est-à-dire à partir d'images simulées de demi-couronnes (III.1.2.3.1 et III.1.2.3.2). Cette analyse est réalisée en deux étapes :

- l'estimation de la performance de l'AROCS suivant le critère avec recherche exhaustive des paramètres (test de toutes les combinaisons), noté AROCS-RE,
- l'estimation de la performance de l'AROCS par optimisation exhaustive multi-résolution, noté AROCS-RE-MR, et les algorithmes AROCS-AG et AG2 pour le critère sélectionné.

Cette analyse nous permet premièrement de comparer l'AROCS avec la TH pour différents critères. Nous vérifions ensuite si la variante proposée RE-MR et la technique d'optimisation stochastique par AG permettent d'approcher correctement l'AROCS-RE. Par rapport au cas de la TH, l'AROCS requiert un point d'accès. Il est fixé à partir de la 'vérité terrain' par un point situé dans la demi-couronne, sur la droite orientée dans la direction de visée et passant par le centre. Par contre, l'épaisseur est déterminée lors de l'optimisation.

III.2.4.1. Etude sur le critère

Le tableau 3-4 résume les performances moyennes de l'AROCS-RE. Les meilleurs résultats sont obtenus avec :

- les critères statistiques $R\mu$, $\Delta\mu/\gamma_2$ et $R\sigma \cdot \Delta\mu/\gamma_2$,
- les deux critères binaires mesurant la densité des échos forts. A faible contraste, ces critères semblent moins performants que les critères statistiques mais deviennent aussi performants à partir d'un contraste de 3.

Le dernier critère fondé sur les fonctions d'appartenance paraît moins bon, en particulier à faible contraste (2 et 3). Le critère moins fort, où $CF2$ est modifié pour ne considérer que la première condition (les points appartiennent au sol), donnerait peut-être de meilleurs résultats.

Mesure en %	contraste=2			contraste=3			contraste=6		
	P_t	P_m	T	P_t	P_m	T	P_t	P_m	T
$Rffmax$	60	70	45	60	68	60	68	77	59
$Rffmax \cdot \Delta\mu/\gamma_2$	71	39	66	67	42	73	74	44	73
$R\mu$	84	21	82	84	21	87	88	19	89
$\Delta\mu/\gamma_2$	87	23	82	87	23	87	87	22	88
$R\sigma$	77	40	69	76	41	76	76	50	71
$R\sigma \cdot \Delta\mu/\gamma_2$	86	25	81	87	25	86	85	33	82
$R\gamma$	63	62	51	67	61	64	68	57	65
$CB1 + CB2$	82	24	79	85	22	87	87	19	89
$CB1 \cdot CB2$	82	24	79	85	22	87	87	19	89
$CF1 + CF2$	80	26	77	82	26	84	84	22	87
TH 2-D accumulation des gradients et normalisation par le nombre de points participants	69	26	72	70	26	72	73	25	74
TH 3-D accumulation binaire	80	43	69	88	33	78	91	29	81

tableau 3-4 : performance moyenne de l'AROCS-RE par critère pour trois contrastes : 2, 3 et 6.

Rappel des meilleurs résultats par TH. Statistiques calculées sur 300 réalisations par contraste

Comparativement à la TH (tableau 3-2), nous observons que :

- les T moyens sont meilleurs avec cette méthode. L'écart de performance entre meilleurs résultats par TH et par AROCS-RE est supérieur à plus de 8% quel que soit le contraste,
- en terme de P_i , la TH 3-D est plus performante à partir du contraste de 3. La différence reste néanmoins faible. L'AROCS-RE peut atteindre une P_i meilleure de 7% à faible contraste.

La figure 3-23 présente les variations des écart-types en fonction de la taille de l'échantillon. Les courbes font ressortir que :

- à partir d'environ 100 réalisations, les courbes d'écart-types pour l'AROCS-RE sont plus stables mais continuent à diminuer. Seule la courbe pour le critère statistique $\Delta\mu / \gamma_2$ varie peu,
- le critère statistique $\Delta\mu / \gamma_2$ est plus performant en écart-type que le critère binaire avec un écart-type d'environ 17% contre 22% pour le critère binaire,
- l'AROCS-RE avec le critère binaire a un écart-type comparable à celui de la TH 2-D. Avec le critère statistique, il est amélioré de 5% environ. Par rapport à la TH 3-D non normalisée, les écart-types sont plus petits de 5 à plus de 10%.

Sur la figure 3-24, le comportement de l'AROCS-RE en fonction du rayon pour quatre critères ($\Delta\mu / \gamma_2$, $R\sigma$, $\Delta\mu / \gamma_2$, $CB1 + CB2$, $CF1 + CF2$) est comparé avec celui des TH. L'AROCS-RE semble plus performant que la TH 3-D pour les petits rayons et que la TH 2-D pour les grands rayons, sinon la méthode est équivalente. Les critères les moins sensibles aux rayons sont le critère statistique, $\Delta\mu / \gamma_2$, et le critère binaire.

Nous pouvons conclure qu'en moyenne et en écart-type, le critère $\Delta\mu / \gamma_2$ est le plus performant. Viennent ensuite les autres critères statistiques cités plus haut, les deux critères binaires et le critère fondé sur les fonctions d'appartenance. Comparé avec la TH 3-D, l'AROCS-RE ne fait pas apparaître un comportement sensible au rayon. Les performances de l'AROCS-RE sont meilleures de plus de 8% en moyenne et jusqu'à environ 5% en écart-type par rapport à la TH 2-D.

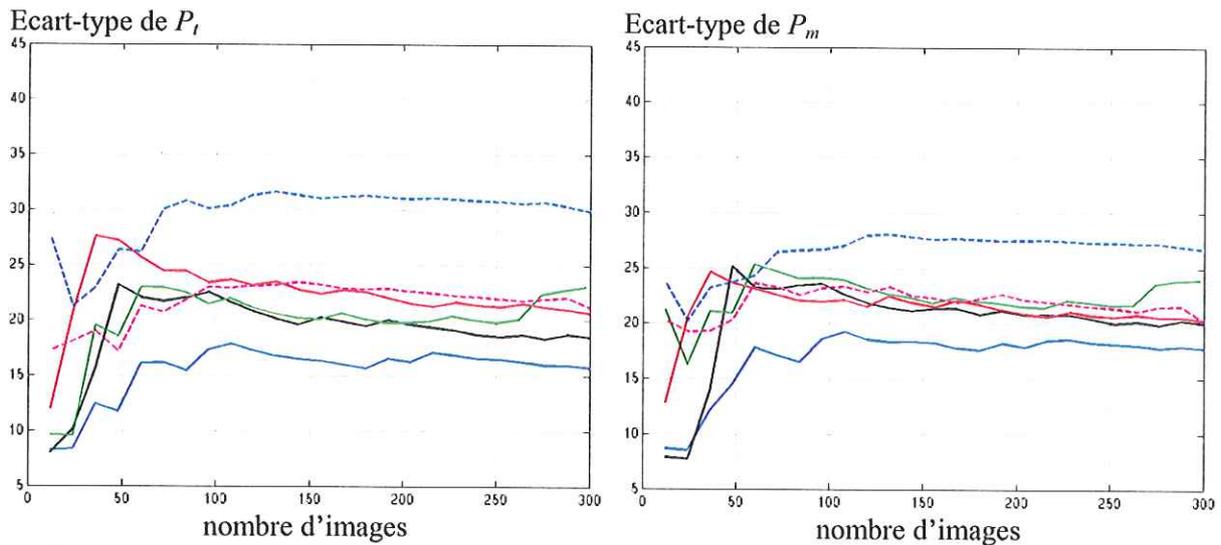


figure 3-23 : variation des écart-types de P_r et P_m en fonction de la taille de l'échantillon, pour les AROCS-RE (trait plein) et les TH 3-D et 2-D (traits pointillés) et un contraste de 2. Voir la légende des couleurs des courbes sur la figure 3-24

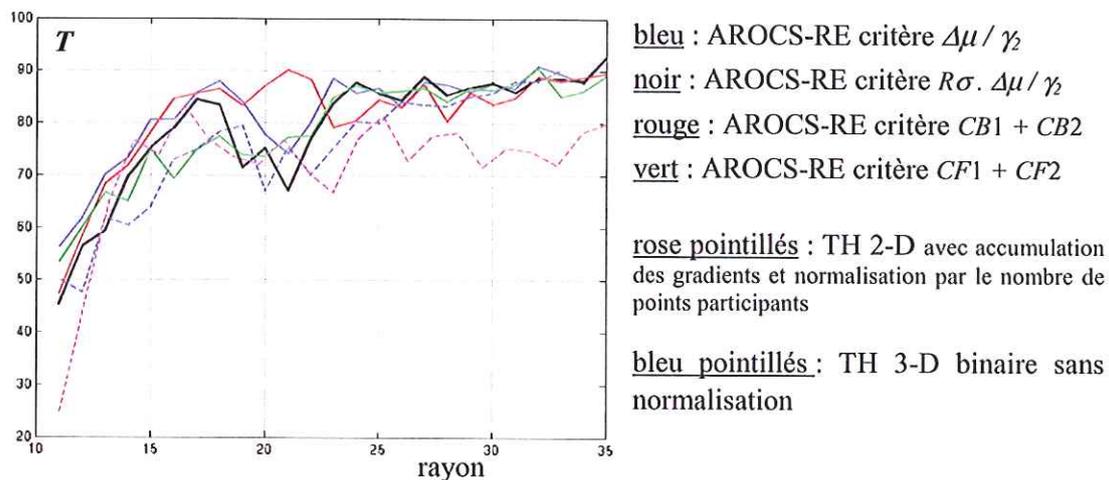


figure 3-24 : moyenne de T en fonction du rayon indépendamment du contraste, soit le calcul de la moyenne sur 36 images par rayon, pour l'AROCS-RE, la TH 2-D et la TH 3-D

III.2.4.2. Etude sur la méthode d'optimisation des paramètres

Les algorithmes plus rapides RE-MR, AG et AG2, sont maintenant étudiés pour le critère binaire $CB1 + CB2$. Nous verrons en effet que le critère statistique $\Delta\mu / \gamma_2$ n'aboutit pas aux meilleurs résultats sur images réelles. L'objectif est de voir si l'optimisation approchée du critère par les méthodes proposées est satisfaisante. L'influence du nombre d'individus par population et du nombre d'itérations dans les algorithmes stochastiques AG et AG2, est aussi observée. Pour ces deux algorithmes, la simulation est exécutée deux fois afin de vérifier la stabilité des estimations réalisées.

D'après le tableau 3-5, on retrouve bien que les performances de l'AG sont meilleures lorsque le nombre d'itérations augmente à nombre d'individus fixe. On atteint les performances moyennes de la méthode exhaustive (79%) avec 100 individus. Les résultats avec 3 sous-populations montrent qu'il faudrait augmenter le nombre d'itérations. La méthode RE-MR semble également prometteur. Cependant, on peut prévoir des erreurs lorsque la première passe aboutit à un maximum local.

Critère binaire, mesure en %	contraste=2					
	P_t		P_m		T	
AG, population simple						
5 itérations, 50 individus	79	80	24	22	78	79
10 itérations, 50 individus	80	81	23	21	79	80
5 itérations, 100 individus	84	84	19	19	83	83
10 itérations, 100 individus	86	87	18	18	84	85
AG2, population à 3 sous-populations						
5 itérations, 20 individus par sous-population	74	74	28	27	73	74
10 itérations, 20 individus par sous-population	76	75	26	27	75	74
5 itérations, 40 individus par sous-population	78	78	24	24	77	77
10 itérations, 40 individus par sous-population	79	78	23	23	78	78
Multi-résolution	85		21		82	

tableau 3-5 : performance moyenne (graphique 2) de l'AROCS avec le critère binaire $CB1 + CB2$ en fonction de la méthode d'optimisation des paramètres (AG, AG2 et RE-MR) pour un contraste de 2

Les mesures sont parfois meilleures que dans le cas de la méthode exhaustive ce qui peut paraître étonnant. En réalité, ceci s'explique par l'étude des écart-types sur la figure 3-25. A partir de ces courbes, on observe en effet que les écart-types diminuent linéairement à partir d'un échantillon d'environ 100 réalisations. Ce faisant, les mesures moyennes ne sont pas totalement fiables mais donnent tout de même un ordre de grandeur des performances. On constate ainsi que l'approche par AG aboutit à un écart-type plus faible que l'approche RE-MR. Il est risqué de comparer les performances avec la TH car les courbes pour les méthodes stochastiques continuent d'évoluer au bout de 300 réalisations.

Sur la figure 3-26, nous vérifions que les AROCS-RE-MR, AG et AG2 ont un comportement similaire à l'AROCS-RE lorsque les rayons varient.

Nous concluons que l'AROCS-AG ou AG2 permettent d'atteindre des performances comparables à l'AROCS-RE et ont le même comportement suivant le rayon.

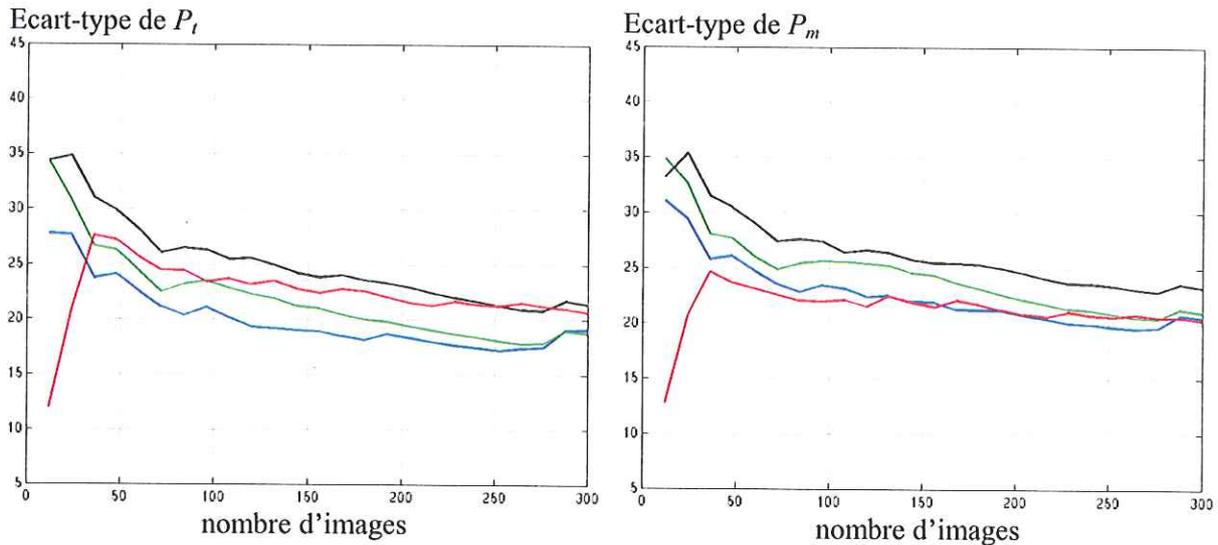


figure 3-25 : variation des écart-types de P_t et P_m en fonction de la taille de l'échantillon (graphique 1) pour les AROCS (trait plein) et les TH 2-D et 3-D (trait pointillés) avec un contraste de 2. Légende des couleurs des courbes sur la figure 3-26

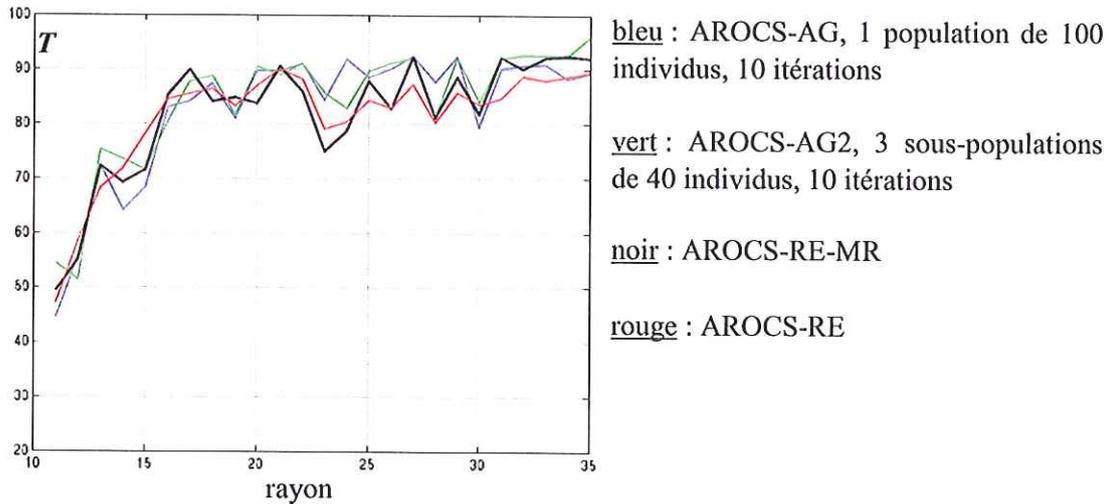


figure 3-26 : moyenne de T en fonction du rayon indépendamment du contraste (graphique 3), soit le calcul sur 36 réalisations par rayon, pour l'AROCS-RE, RE-MR, AG, AG2 et les TH 2-D et 3-D

III.2.5. Résultats sur l'extraction des cuves par AROCS-AG ou AG2

Nous présentons les résultats de l'AROCS-AG ou AG2. La technique modifiée AG2 est utilisée lorsque de petites cuves sont présentes. Les critères utilisés sont le critère statistique $\Delta\mu / \gamma$, le critère binaire $CB1$. $CB2$ et le critère $CF1 + CF2$. Suite à quelques tests sur images réelles, le critère binaire $CB1$. $CB2$ s'est en effet révélé légèrement meilleur que le critère $CB1 + CB2$. L'algorithme est testé sur les vues 1, 2 et 4 de la zone A (figure 1-20) et les deux vues de la zone B (figure 1-21).

L'évaluation quantitative de ces résultats à partir des vérités terrain (cf. ANNEXE C) est proposée dans le tableau 3-6. Les mesures suivantes effectuées manuellement y sont indiquées :

- le nombre de points d'accès à l'initialisation de l'AROCS,

- la probabilité de détection, p_d , définie par le nombre de demi-couronnes détectées sur le nombre de cuves dans la scène. Un seul écho de sens positif est compté par cuve,
- le pourcentage de rayons mal estimés, r_m , par rapport aux cuves détectées. Un rayon est considéré mal estimé lorsqu'il paraît plus petit ou plus grand et lorsqu'il englobe plusieurs structures brillantes distinctes,
- le taux de fausses alarmes, τ_c , égal au nombre de fausses alarmes sur le nombre d'objets détectés,
- pour les objets à plusieurs échos : le pourcentage d'arcs de sens négatifs incorrects (τ_n).

	critère	nombre de points d'accès	p_d (%)	r_m (%)	τ_c (%)	τ_n (%)
Vue 1 zone A	CB1 . CB2	132	85	11	18	
	CF1 + CF2		78	7	14	
	$\Delta\mu / \gamma_2$		78	21	26	
	rappel TH2-D		79		21	
Vue 2 zone A	CB1 . CB2	178	77	15	15	
	CF1 + CF2		73	13	16	
	$\Delta\mu / \gamma_2$		85	13	22	
Vue 4 zone A	CB1 . CB2	201	87	10	21	
	CF1 + CF2		65	6	25	
	$\Delta\mu / \gamma_2$		76	12	28	
Vue 1 zone B	CB1 . CB2	214	87	2	17	7
	CF1 + CF2		78	3	13	14
	$\Delta\mu / \gamma_2$		59	44	40	44
Vue 2 zone B	CB1 . CB2	400	87	6	30	18
	CF1 + CF2		80	5	36	14
	$\Delta\mu / \gamma_2$		78	51	35	40
	rappel TH2-D		76		47	

tableau 3-6 : évaluation des résultats obtenus par AROCS-AG (sur la zone B) ou AG2 (sur la zone A) par comparaison avec les réalités terrain (ANNEXE G)

Sur les vues de la zone A (figure 3-27), on constate que le critère statistique, $\Delta\mu / \gamma_2$, a échoué sur presque toutes les grandes cuves en trouvant des petites demi-couronnes. Ceci est confirmé dans le tableau où la p_d est bonne tandis que le τ_c et le r_m sont plus forts. Cette différence de performance par rapport à celle estimée précédemment est peut-être liée à la modélisation des amplitudes sur les échos forts par une loi Lognormale lors des simulations, alors que l'adéquation n'est en réalité pas parfaite. Les deux autres critères ont un bon comportement sur les petites et les grandes cuves. L'algorithme est parvenu à séparer en plusieurs objets les petites cuves proches. Ainsi, la meilleure p_d est généralement obtenue avec le critère binaire. Elle est supérieure à celle obtenue avec la TH 2-D pour un taux de fausses alarmes plus petit. La p_d autour de 85% est compatible avec les performances évaluées par simulation. L'estimation du rayon est fautive lorsque l'écho est trop irrégulier, en particulier sur la grande cuve en bas au milieu des images. De plus, les fausses alarmes pour ces deux critères sont peu nombreuses, d'autant qu'un certain nombre de petites cuves visibles sur l'image, sont comptées parmi les fausses alarmes (vers le haut à droite) car la vérité terrain y représente des bâtiments ou des zones d'objets non discriminés.

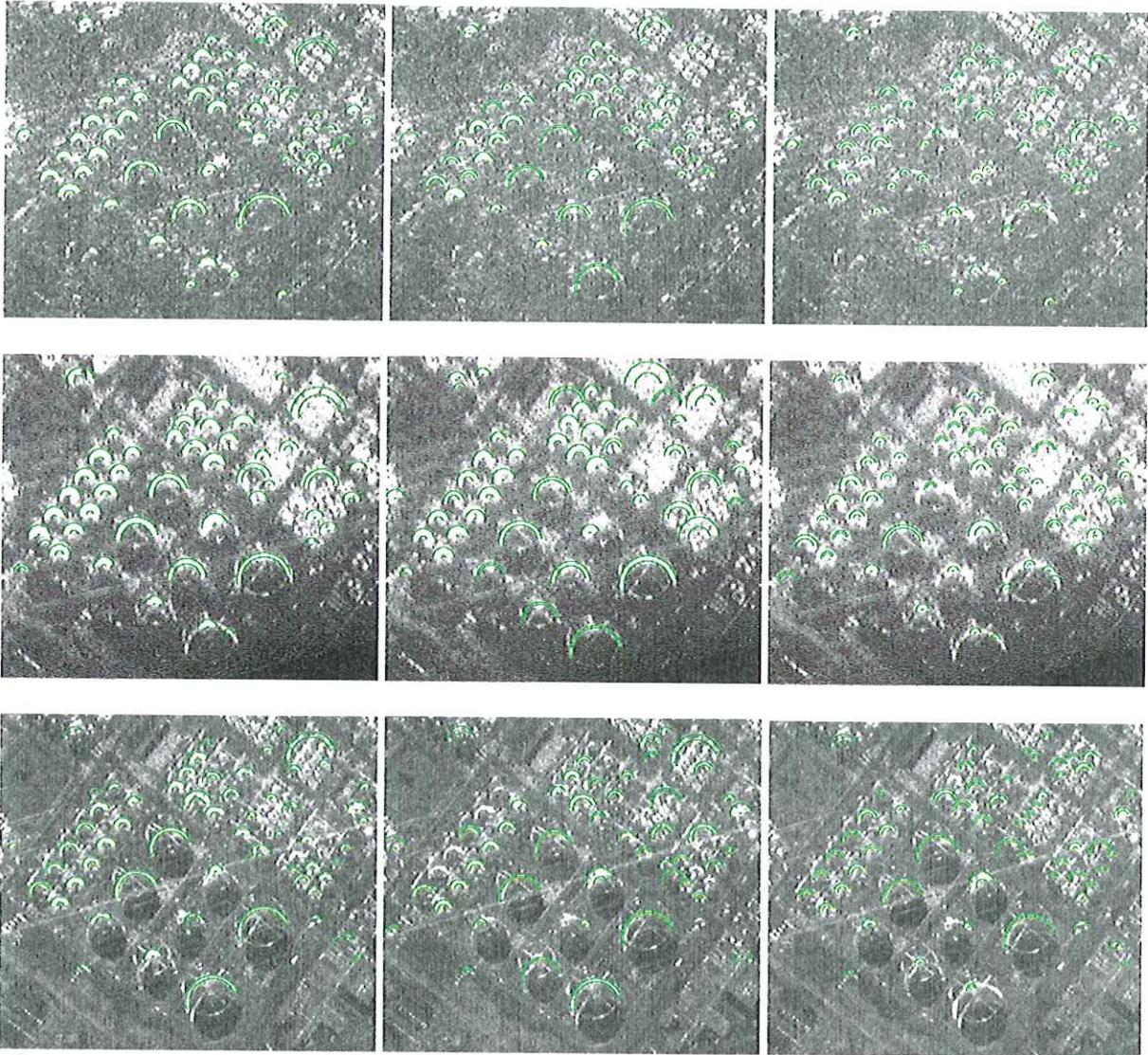


figure 3-27 : Résultats sur les vues 1 en bande S (première ligne), 2 en bande S (deuxième ligne) et 4 en bande X (troisième ligne) de la zone A (figure 1-20) : AROCS-AG2, critères $CB1$. $CB2$, $CF1$ + $CF2$ et $\Delta\mu / \gamma_2$. $R_{min} = 5$, $R_{max} = 35$, sous-populations de 40 individus, $NITER = 10$

Sur la zone B, la notion d'objets a été utilisée, offrant la possibilité de détecter les échos de sens négatifs et permettant d'affiner les rayons des arcs associés. Les résultats sont donc nettement améliorés par rapport à la TH implémentée qui n'inclut pas ces ajouts. Les résultats par critère statistique se révèlent mauvais. Le critère binaire donne à nouveau les meilleurs résultats visuellement (figure 3-28) et quantitativement (tableau 3-6). L'estimation des rayons échoue lorsque l'écho présente une partie manquante importante. Elle a cependant réussi dans la majorité des cas alors que le masque binaire sur ces grandes cuves n'est pas toujours parfait (cf. II.2.2). Ainsi la p_d atteint 87% avec un r_m faible, signifiant que les rayons des objets détectés sont bien estimés. Le τ_c est faible pour la vue 1. Les fausses alarmes résultent souvent d'erreurs d'interprétation liées à la densité d'échos forts. Pour la vue 2, elles sont nombreuses à cause de la zone d'échos forts en bas à droite. Enfin, le faible τ_n sur les cuves de sens négatifs montre que la décision sur le sens est en général correcte.

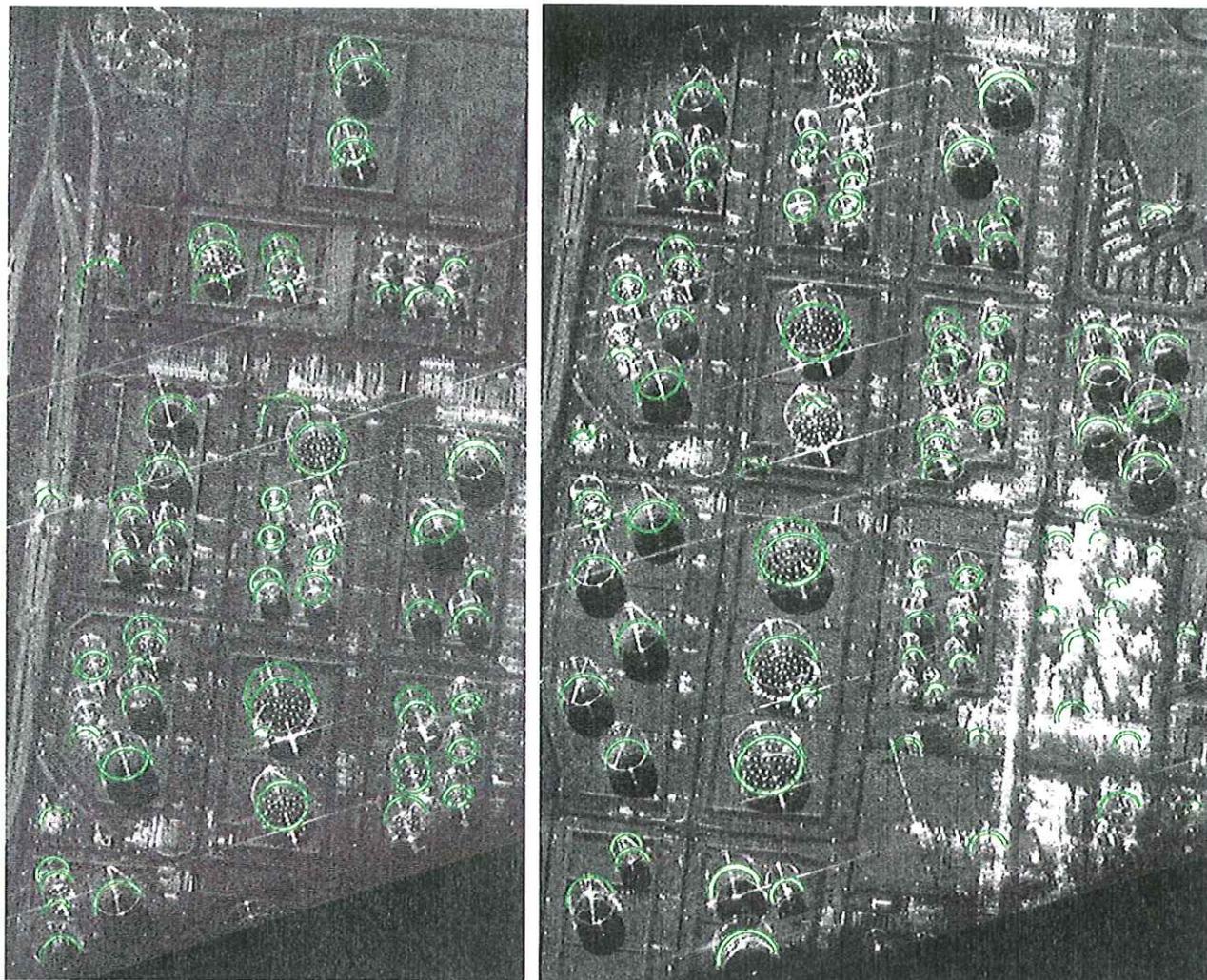


figure 3-28 : Résultats sur les vues 1 et 2 de la zone B en bande X (figure 1-17) : AROCS-AG, critère binaire, $R_{min} = 10$, $R_{max} = 45$, population de 85 individus, $NITER = 10$

III.3. Conclusion sur les cuves

Nous avons tout d'abord étudié l'extraction des échos forts formant des demi-cercles épais par TH. Les TH 2-D et 3-D circulaires ont été implémentées et comparées suivant le choix de l'accumulation et de la normalisation grâce à des simulations d'images contenant une demi-couronne brillante. Il en est ressorti que dans le cas où un ordre de grandeur de la taille des objets est connu, la TH 3-D binaire est la plus performante en terme de probabilité de détection. Dans le cas contraire, la TH 2-D avec accumulation des gradients est moins sensible au rayon. La probabilité de détection est alors autour de 70% avec un écart-type et un taux de fausses alarmes d'environ 25%. Sur images réelles, les deux techniques sont sensibles au choix des seuils. Ces seuils sont d'autant plus difficiles à choisir que la réponse des objets sur les images radar varie en fonction de l'incidence.

L'approche par l'algorithme de reconnaissance des formes par optimisation d'un critère surfacique, noté AROCS, permet de s'affranchir de ces seuils. Cette technique prend en compte les caractéristiques géométriques et radiométriques des structures brillantes à détecter et exploite le contraste statistique entre la forme et le fond. Comme la TH 2-D, elle ne montre pas de comportement

sensible au rayon. La méthode nécessite cependant une initialisation, le choix d'un critère judicieux et une méthode d'optimisation. L'initialisation choisie - par maxima locaux - est peu discriminante et pourra être améliorée si l'on souhaite traiter des scènes contenant plusieurs types d'objets. Plusieurs critères ont été comparés par le biais des images simulées. Trois types de critères sont retenus : statistique, binaire et fondé sur des fonctions d'appartenance. Les mesures effectuées montrent que l'AROCS permet d'atteindre avec ces critères des probabilités de détection meilleures que la TH 2-D avec des écart-types et des taux de fausses alarmes comparables ou inférieurs. Les algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres permettent d'atteindre une performance comparable à celle de la méthode exhaustive. Sur images réelles, le critère statistique aboutit à des résultats parfois mauvais. Le critère binaire a le meilleur comportement avec une probabilité de détection de 85% pour un taux de fausses alarmes autour de 15-20% et une erreur d'estimation des rayons faible, dans les 10%. Ainsi, l'AROCS a généralement réussi à résoudre les ambiguïtés liées à la proximité des objets et à choisir correctement le sens de l'écho.

Notons que le critère binaire est séparable. Dans ce cas, la méthode rapide de calcul du critère présentée dans [CHESNAUD99] pourra être implémentée pour améliorer la rapidité de l'algorithme, tout en restant dans le cadre de l'optimisation stochastique.

IV. Extraction des bâtiments

IV.1. Démarche

Suite à l'étude sur les cuves, nous nous intéressons aux bâtiments. L'objectif est d'adapter l'AROCS à l'extraction des structures linéaires brillantes en forme de 'L'. D'après la modélisation simplifiée de l'image radar d'un bâtiment que l'on s'est donnée (figure 3-1), le 'L' brillant recherché peut être croisé par les échos forts issus du bord du toit. Il se forme alors des croix, des coins ou des 'T' brillants (figure 3-29).

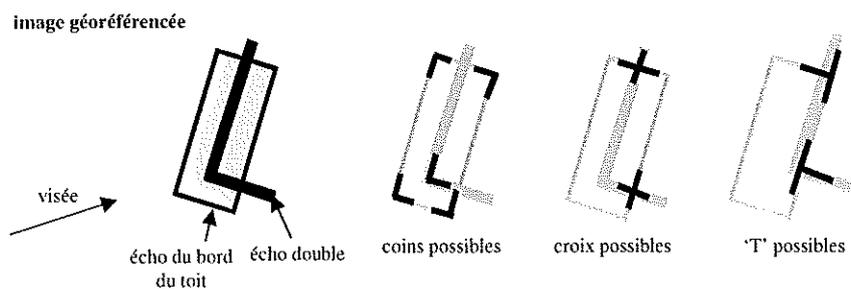


figure 3-29 : modélisation d'un bâtiment simple, localisation possible de croix, 'T' et coins brillants

Nous proposons de détecter ces intersections par TH pour fournir une initialisation robuste à l'extraction. L'AROCS est alors étendu à la reconnaissance des meilleurs rectangles englobant la ligne d'échos forts à partir de chaque côté des intersections, afin d'extraire le 'L' par morceaux. Cette approche trouve un double intérêt :

- comme pour les demi-couronnes des cuves, nous exploitons les différences radiométriques entre forme et fond,

- la recherche d'un rectangle et non d'une droite permet de prendre en compte l'irrégularité des amplitudes le long de la ligne et la déformation de la droite dans l'image géoréférencée grâce à l'épaisseur du rectangle.

On note cependant que les croix ou les 'T' entre l'écho double et l'écho du bord du toit ne correspondent pas à un point réel sur le terrain. Leur position sur l'image radar dépend de la hauteur de la structure et de l'angle d'incidence. Ces intersections existent si l'écho du bord du toit a lieu et si la surface du toit est suffisante par rapport à la hauteur et l'incidence. En monoscopie, ceci n'est pas gênant. Par contre, en stéréoscopie, les deux intersections sur chaque image ne se correspondent pas et devront être identifiées avant la mise en correspondance. De plus, les intersections de lignes brillantes ne coïncident pas toujours avec un bâtiment. Elles peuvent par exemple avoir lieu sur des rails. En l'absence de visibilité des ombres et de toit texturé, il ne sera pas possible de supprimer ces fausses alarmes.

IV.2. Détection des bâtiments par TH

Nous recherchons l'information sûre et pertinente que l'on peut extraire par TH sur les masques binaires. Deux variantes de TH dédiées à la détection de droites sont testées :

- la TH globale pour extraire l'orientation globale des bâtiments,
- la TH adaptée à la détection de droites perpendiculaires afin d'extraire les croix, 'T' et coins ('L') typiques des bâtiments.

Ces deux approches sont présentées avec quelques résultats typiques. Nous en dégageons les éléments pouvant être utilisés pour l'initialisation de l'affinage de la forme par l'AROCs.

IV.2.1. Application de la TH à la détection de droites

Les droites sont décrites en coordonnées polaires par deux paramètres (ρ, θ) . La transformation de l'espace image à l'espace 2-D des (ρ, θ) revient à incrémenter les points $(x \cos \theta - y \sin \theta, \theta)$ pour chaque pixel (x, y) (figure 3-30). Nous utilisons des pas de discrétisation égaux à 1 pour les deux paramètres.

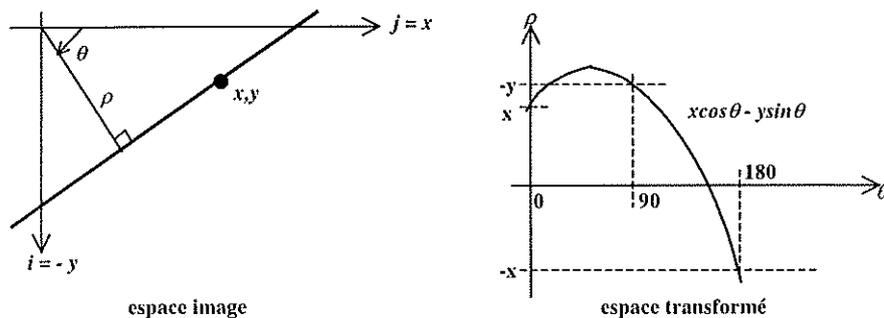


figure 3-30 : TH pour les droites

IV.2.2. Détection de lignes par algorithme de TH globale

Nous observons sur nos images que les bâtiments sont souvent alignés suivant une direction privilégiée : ils suivent des quais ou des routes parallèles. Dans le cas où cette hypothèse est vérifiée, un algorithme de TH globale appliqué sur le masque binaire nous permet d'extraire cette orientation.

IV.2.2.1. Algorithme

La table d'accumulation est produite par accumulation binaire à partir du masque binaire. Comme pour les TH circulaires, l'algorithme est itératif avec à chaque étape la sélection du pic principal puis la mise à jour de la table avant la sélection du pic suivant. L'algorithme se termine lorsque le pic détecté a une valeur inférieure à un seuil.

Les valeurs accumulées sont pondérées par deux facteurs :

- la pondération par le cosinus de la différence entre la pente de la droite et la direction locale du gradient, similaire à la pondération utilisée dans la TH 3-D (figure 3-9),
- la pondération par une fonction d'influence pour prendre en compte l'épaisseur des structures linéaires [KYRIATI91]. Elle s'exprime par :

$K(|\rho_i - \rho_0|)$ avec ρ_0 le paramètre de la droite au point traité (x, y) ,

ρ_i celui au point (x_i, y_i) ,

K la fonction d'influence : $K(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } |u| \leq w \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

w le rayon du disque d'incertitude (demi-largeur de la droite).

Cette opération revient à accumuler une valeur pondérée par $K(u)$ pour les droites $(\theta, \rho_0 \pm u)$. Faisant l'hypothèse de traits d'épaisseur 3 pixels ($w = 1.5$), la fonction utilisée à l'ONERA/DTIM est légèrement différente, donnant un poids plus fort pour les pixels sur la ligne centrale sur l'écho épais :

$$K(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u = 0 \\ 0.7 & \text{si } |u| = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le seuil de sélection est proportionnel au nombre minimum N de points voulus par droite. Ce nombre est donné par l'épaisseur que multiplie la longueur minimale des segments à détecter. De même que pour les cercles, nous prenons $0,7N$ en binaire.

IV.2.2.2. Orientation privilégiée

Une fois les droites extraites, la direction privilégiée, si elle existe, est estimée par la moyenne tronquée à un écart-type des orientations des droites détectées. Ceci permet de supprimer l'influence des droites 'aberrantes'. Notons que les images RAMSES contiennent au moins une ligne brillante le long de l'axe azimutal, issue d'un artefact de la chaîne de traitement. Si plusieurs droites sont détectées sur ces lignes, il convient de les supprimer soit manuellement, soit grâce à la connaissance de la direction de visée, avant la mesure de l'orientation globale.

IV.2.2.3. Exemples de résultats par TH globale

La figure 3-31 représente deux exemples de résultats. Par rapport à une mesure manuelle effectuée sur un contour de bâtiment, les directions sont correctement estimées à 1° près. Nous observons que les droites obtenues ne peuvent pas être utilisées pour l'extraction des bâtiments. En effet, les structures ne sont pas toujours exactement alignées. Ainsi, certaines droites résultent de plusieurs bâtiments à la fois mais ne sont pas assez bien localisées pour chacun d'eux. Par contre, l'orientation principale est suffisamment précise pour être exploitée lors de l'extraction des bâtiments. Tous les bâtiments ne suivant pas cette orientation, l'utilisation de cette contrainte peut donc être limitative.

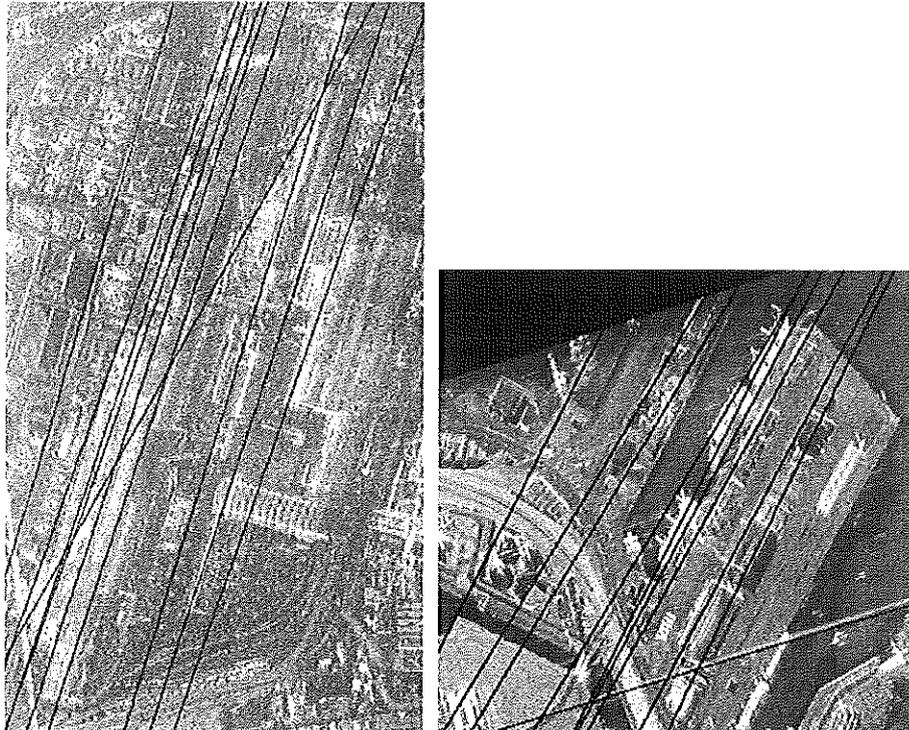


figure 3-31 : TH globale, accumulation binaire. Longueur minimale=300 pour l'image de gauche de taille 1510x860, direction globale=18°. Longueur minimale=200 pour l'image de droite de taille 640x670, direction globale=29°

IV.2.3. Détection de croix/T/coins par algorithme de TH locale modifiée

En global, les lignes ne sont pas positionnées assez précisément pour extraire directement les bâtiments. Un traitement local semble donc plus opportun. Avant de s'intéresser aux croix/T/coins, un test sur la détection de segments par TH locale a été réalisé pour voir s'il est possible de trouver directement une information pertinente sur les lignes brillantes et leurs extrémités (voir ANNEXE G). Il s'avère qu'un post-traitement serait nécessaire pour reconnecter les segments, nécessitant alors le choix de seuils déterminants. De plus, la détection présente des fausses alarmes qui pourrait être facilement supprimées en recherchant des lignes brillantes perpendiculaires.

IV.2.3.1. Algorithme

L'image est traitée localement par bloc glissant. Sur chaque bloc, l'algorithme suit le même fonctionnement que celui de la TH globale. Pour réduire les non-détections qui ont lieu lorsqu'une structure se situe entre deux blocs, nous optons pour le recouvrement des blocs successifs. Le taux de recouvrement peut être élevé afin de détecter toutes les structures. Sur chaque bloc, les couples de lignes perpendiculaires sont retenus selon la procédure suivante :

- sélection de la 'meilleure' droite du bloc,
- sélection de la 'meilleure' droite perpendiculaire,
- validation du couple si les valeurs accumulées de part et d'autre de l'intersection sur une longueur lg , sont supérieures à un seuil. Dans le cadre de la détection de 'L', cette condition doit être remplie sur au moins deux côtés perpendiculaires depuis le point d'intersection.

Outre le taux de recouvrement des blocs, quatre seuils sont importants : la taille du bloc, le seuil de sélection d'une droite, la longueur lg et le seuil de validation. On se ramène au seul choix de lg en fixant la taille du bloc à 3 fois cette longueur. Les seuils de sélection et de validation en binaire sont comme précédemment proportionnels à la longueur minimale et à l'épaisseur du trait. La longueur lg est donc déterminante et majorée par la longueur du plus petit côté d'un bâtiment que l'on souhaite détecter.

A l'issue de ce procédé, les échos brillants en forme de croix, coins ('L') et 'T', sont détectés. La décision entre ces trois possibilités dépend simplement de la condition de validité étudiée sur chaque côté de l'intersection.

IV.2.3.2. Exemples de résultats de la détection des croix/T/coins par TH locale modifiée

Nous avons utilisé l'orientation principale issue de la TH globale pour contraindre la détection aux croix/T/coins de direction compatible à $\pm 10^\circ$.

Comparé avec la réalité terrain (ANNEXE C), le résultat sur l'image en bande S (figure 3-32) montre que les 12 grands bâtiments sont détectés par une croix. Sur les 14 bâtiments de taille moyenne, 7 forment un 'L' et nous en détectons 6. Les bâtiments de petite taille sont parfois détectés (en haut à gauche) mais les croix ne sont pas toujours bien positionnées. Des croix sont également trouvées sur le côté gauche du grand bâtiment en bas à gauche du fait de nombreux échos forts. Par ailleurs, on constate que la décision entre croix/T/coins est généralement juste.

Sur la figure suivante (figure 3-33) présentant le résultat sur une image en bande X, on compte que 7 bâtiments de taille moyenne sont détectés sur 10 dont 8 formant un 'L' (cf. ANNEXE C). Le huitième 'L' n'est pas détecté car il n'est pas dirigé suivant l'orientation privilégiée. Les petits bâtiments ne sont pas détectés. Par contre, des croix sont repérées sur les bateaux, ponts et autre groupement d'échos forts. La décision entre croix/T/coins est également satisfaisante malgré quelques erreurs.

Nous pouvons conclure que cette détection de coins est performante. A partir de ces amorces, la longueur de l'écho fort peut alors être déterminée par un algorithme recherchant la plus longue droite possible sur chaque côté. Les fausses alarmes sont peu nombreuses et ont lieu sur les amas d'échos forts qui n'ont pas été supprimés lors de la fusion classification/détection de lignes. Néanmoins, les précisions de localisation et d'orientation ne sont pas toujours très bonnes à cause du bruit des images, du bruit de corrélation et de l'épaisseur des échos. De plus, comme nous l'avons précisé plus haut

(figure 3-29), des croix sont détectées sur les échos du bord du toit et à l'intersection entre écho du toit et écho double (1 exemple encerclé en noir sur la figure 3-32 et 2 sur la figure 3-33).

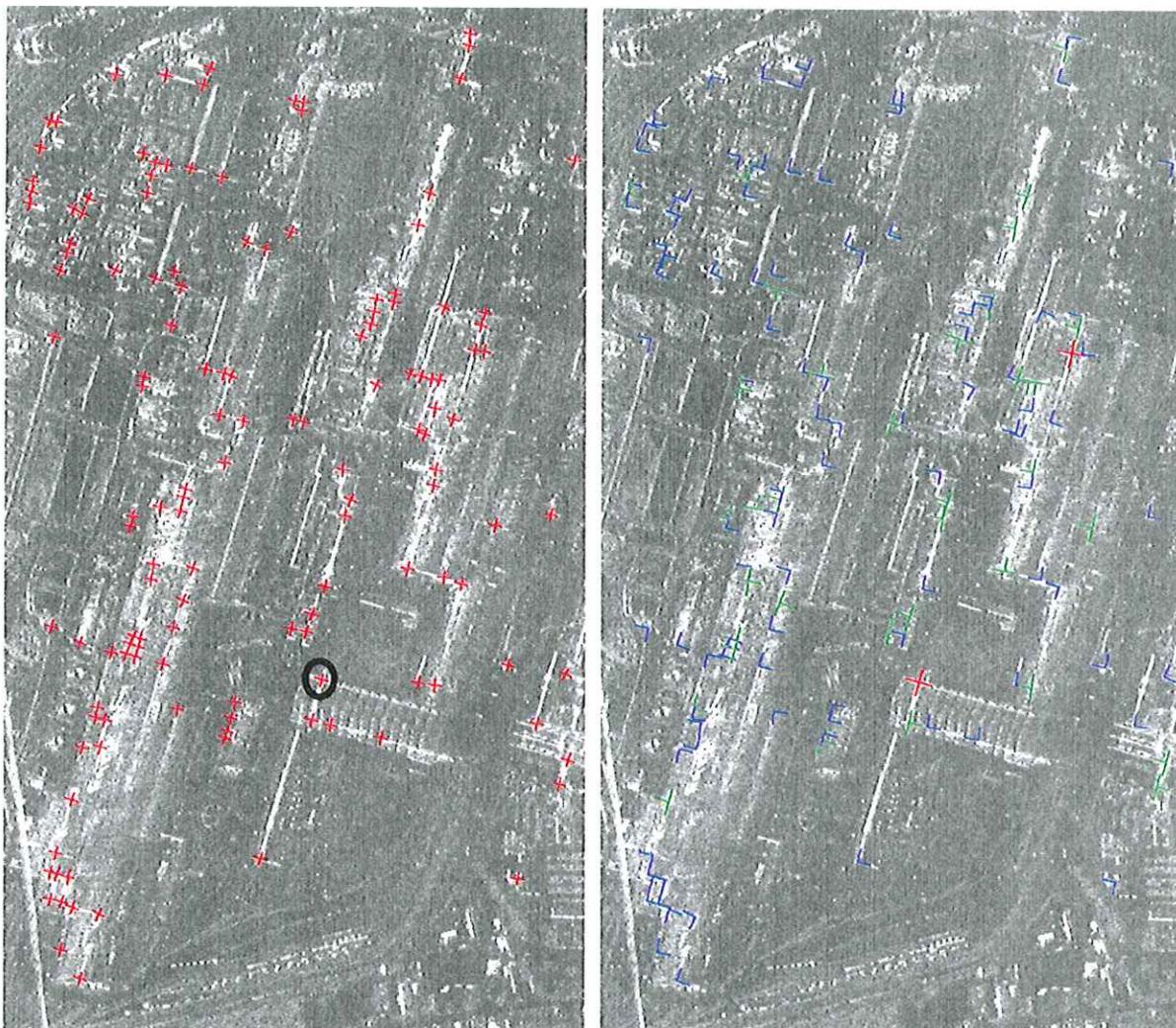


figure 3-32 : TH locale modifiée sur une image en bande S, croix et décision croix/T/coins. Longueur=20. Le cercle noir indique une croix entre l'écho double et l'écho du bord du toit



figure 3-33 : TH locale modifiée sur une image en bande X, croix et décision croix/T/coins. Longueur=20. Les cercles noirs indiquent des croix entre l'écho double et l'écho du bord du toit

IV.2.4. Conclusion sur la TH pour les bâtiments

La TH avec une simple accumulation binaire fournit une détection fiable des bâtiments de taille moyenne ou grande. D'une part, la TH globale permet de mesurer de façon précise l'orientation privilégiée dans la scène, si elle existe. Un opérateur doit choisir s'il est opportun de calculer cette orientation. D'autre part, l'algorithme de TH locale dédié à la détection des intersections des lignes brillantes donne une amorce sur les bâtiments formant un coin brillant sur les images. De plus, l'orientation privilégiée peut raisonnablement être utilisée pour limiter les fausses alarmes. Les coins détectés correspondent à l'écho du toit, à l'écho double ou à l'intersection de ces deux échos. En stéréoscopie, il sera nécessaire de décider quelles sont les intersections qui correspondent à un point au sol, élevé ou inexistant. Pour trouver les extrémités de chaque droite issue d'un côté d'une intersection, nous proposons ci-dessous d'étendre l'AROCS à la reconnaissance du meilleur rectangle englobant la ligne d'échos forts.

IV.3. Extension de l'AROCS aux bâtiments

Nous étendons l'AROCS développé pour la reconnaissance de demi-couronne à la reconnaissance d'un rectangle. Après avoir présenté le principe de cette méthode, nous nous intéressons à la technique d'optimisation des paramètres. Deux algorithmes stochastiques sont proposés, le premier utilisant les AG et le second basé sur une recherche séquentielle des paramètres. Les résultats sur images réelles sont ensuite évalués.

IV.3.1. Algorithme

IV.3.1.1. Principe général

L'initialisation peut être assurée par les coins, 'T' ou croix détectées par l'algorithme de TH locale modifiée. Sur un bâtiment, les trois cas peuvent se produire. Nous avons observé que la décision entre les trois types d'intersection peut présenter quelques erreurs. Par conséquent, nous conservons toutes les intersections détectées mais avant la décision. Ces croix servent d'initialisation et le type d'intersection, coin, 'T' ou croix, sera décidé lors de l'AROCS.

La méthode proposée consiste alors à agrandir un rectangle de chaque côté de la croix afin d'englober la ligne d'échos forts. Le rectangle initial est construit avec des paramètres par défaut et à partir de la croix (figure 3-34). Un critère, parmi ceux définis pour les cuves (cf. III.2.2.3), est ensuite optimisé afin de trouver la combinaison des paramètres qui permet d'obtenir le bon rectangle. Le rectangle est défini par cinq paramètres : numéros de ligne et colonne pour son coin de référence (i_0, j_0) , orientation θ , épaisseur l et longueur L (figure 3-35). Du fait de l'imprécision, même légère, sur la position et l'orientation de la croix, il nous semble utile de modifier les cinq paramètres lors de l'optimisation du critère. Les rectangles obtenus et connectés, même s'ils sont issus d'une croix différente, sont attribués à un objet identique correspondant un bâtiment sur le terrain.

Comme pour les demi-couronnes, le critère est calculé sur la forme testée et le fond, défini par une boîte englobante. Cette boîte est un rectangle orienté suivant la même direction que la forme. Les bords sont distants d'une distance d de la forme et de $2d$ du côté où la longueur du segment peut augmenter (figure 3-36). Cette distance d est fixée à 10 pixels.

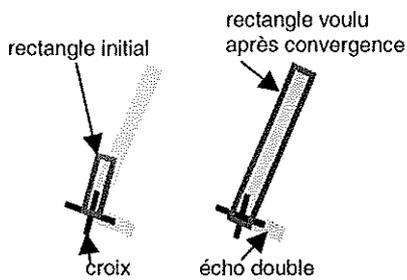


figure 3-34 : rectangle initial et rectangle voulu à la convergence

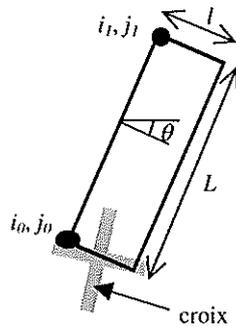


figure 3-35 : codage du rectangle

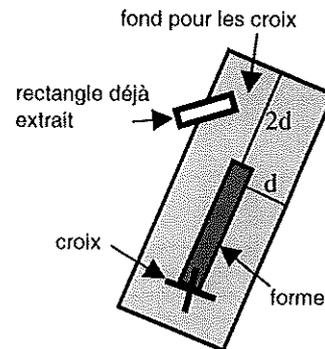


figure 3-36 : pixels participant au fond en gris clair et à la forme en gris foncé

Des contraintes radiométriques et géométriques sont utilisées :

- la proportion de points échos forts doit être supérieure à 50% dans la forme,
- l'accroissement de longueur du rectangle s'arrête à la rencontre d'une autre croix.

IV.3.1.2. Affinage de la forme par repositionnement / accroissement de longueur

Par rapport au cas des cuves, un paramètre supplémentaire doit être trouvé. Le domaine de recherche pour la longueur pouvant être très grand, toutes les combinaisons de paramètres ne peuvent être testées en une durée de traitement raisonnable. Nous utilisons donc une méthode approchée d'optimisation du critère. De plus, la croix fournit une initialisation assez précise (orientation, point de référence) qu'il convient d'exploiter davantage pour réduire le domaine des solutions exploré. Dans le cas de la demi-couronne, les paramètres sont fortement liés, c'est-à-dire que la modification élémentaire d'un paramètre peut modifier radicalement la forme. Dans le cas du rectangle initialisé par un segment, la position du point de référence et l'orientation sont des amorces non exactes mais relativement précises. Nous proposons donc d'affiner la forme itérativement en deux phases distinctes :

- le repositionnement du rectangle par recherche locale de la meilleure forme. Durant cette étape, les paramètres varient sur des domaines restreints,
- l'accroissement de la longueur visant à agrandir le plus possible le rectangle.

IV.3.2. Méthode d'optimisation des paramètres

Nous proposons deux méthodes stochastiques d'optimisation du critère : l'AG et une approche séquentielle de recherche des paramètres.

IV.3.2.1. Par algorithmes génétiques

La longueur L peut varier entre quelques pixels et plusieurs centaines de pixels. La recombinaison entre individus de longueurs très différentes, risque d'aboutir à des individus irréalisables. Nous adoptons donc un AG hybride itératif en trois étapes :

1. repositionnement du rectangle par AG avec L qui varie peu. L'initialisation est aléatoire. Les domaines de variation des paramètres i_0, j_0, θ, l et L sont fixés à :

$$\begin{aligned} & \pm \varepsilon_p \text{ pixels pour } i_0, j_0, \\ & \pm \varepsilon_t \text{ pour } \theta, \\ & [l_{\min}, l_{\max}] \text{ pour } l, \\ & [L_{\min}, L_{\text{med}}] \text{ pour } L. \end{aligned}$$

La taille de la population est prise égale à la longueur de codage d'un individu. Dans notre cas, nous fixons : $\varepsilon_p = 3$, $\varepsilon_t = 10^\circ$, $l_{\min} = 3$, $l_{\max} = 10$, $L_{\min} = 5$ et $L_{\text{med}} = 40$, ce qui donne une population de l'ordre de 75 individus. Le choix des paramètres ε_p , l_{\min} et ε_t est lié à l'épaisseur du trait de 3 pixels et à la tolérance de 10° par rapport à l'orientation privilégiée, utilisées lors de la détection des croix par la TH locale modifiée. Le paramètre L_{med} a été choisi afin d'obtenir une longueur de codage et donc une population de taille raisonnable. Les taux de croisement et de mutation, la pression de sélection et le nombre d'itérations maximal sont choisis comme dans le paragraphe III.2.3.3.

2. accroissement de L . A l'issue de l'étape 1, le rectangle est bien positionné et nous testons la possibilité d'accroître sa longueur. Le paramètre L peut varier jusqu'à 500 pixels. Le critère est calculé uniquement sur l'accroissement de longueur sans prendre en compte le fond. En effet, tant que le rectangle n'englobe pas toute la ligne d'échos forts, le critère prenant en compte le fond n'est pas nécessairement meilleur lorsque la longueur augmente à cause des points brillants toujours contenus dans le fond. Le critère calculé uniquement sur l'accroissement est noté C' . L'accroissement est accepté si la valeur du critère modifié est supérieure au seuil $\text{seuil}_{\text{accr}}$. Cette étape s'arrête au bout de N_{ACCR} tests d'augmentation de longueur rejetés.
3. retour à l'étape 1 si la longueur est modifiée lors de l'étape 2 ou arrêt. L'algorithme peut boucler pendant un nombre maximal de tours, N_{TOUR} .

Nous choisissons : $N_{\text{TOUR}} = 5$ et $N_{\text{ACCR}} = 5$ pixels. Le seuil $\text{seuil}_{\text{accr}}$ contrôle l'accroissement de longueur et dépend du critère. Pour un critère normalisé, comme les critères binaires et ceux fondés sur les fonctions d'appartenance, on prend un $\text{seuil}_{\text{accr}}$ de 0.5.

IV.3.2.2. Par méthode séquentielle

Nous proposons une seconde méthode stochastique plus intuitive. Elle consiste à modifier un ou deux paramètres à la fois pour optimiser localement le critère. A chaque itération, le paramètre qui est changé, est choisi aléatoirement (figure 3-37). Afin de rester dans le cadre de l'affinage par repositionnement/accroissement, l'algorithme passe par une étape de variation de la longueur L après la modification de tout autre paramètre.

Nous commençons par la recherche de L . Ce paramètre augmente tant que le critère C' , testé sur l'accroissement de longueur, est supérieur au seuil $\text{seuil}_{\text{accr}}$. Un tirage aléatoire décide du paramètre recherché suivant. L'algorithme s'arrête lorsqu'aucun nouveau rectangle n'est trouvé au bout d'un nombre N_{tourmax} de tentatives de modification d'un paramètre.

Lors du repositionnement local par modification de l'orientation, le rectangle peut se positionner sur des échos forts issus d'une autre structure brillante. Ceci est possible si la longueur est importante même pour un écart angulaire faible. Pour éviter ce cas, nous autorisons le changement d'orientation si le point (i_l, j_l) , situé à l'autre extrémité du segment issu du point de référence (figure 3-35), reste dans le voisinage de sa position précédente. La taille du voisinage utilisée est 5×5 .

Nous prenons $N_{\text{tourmax}} = 30$ et nommons cette méthode AROCS-OS pour Optimisation Séquentielle.

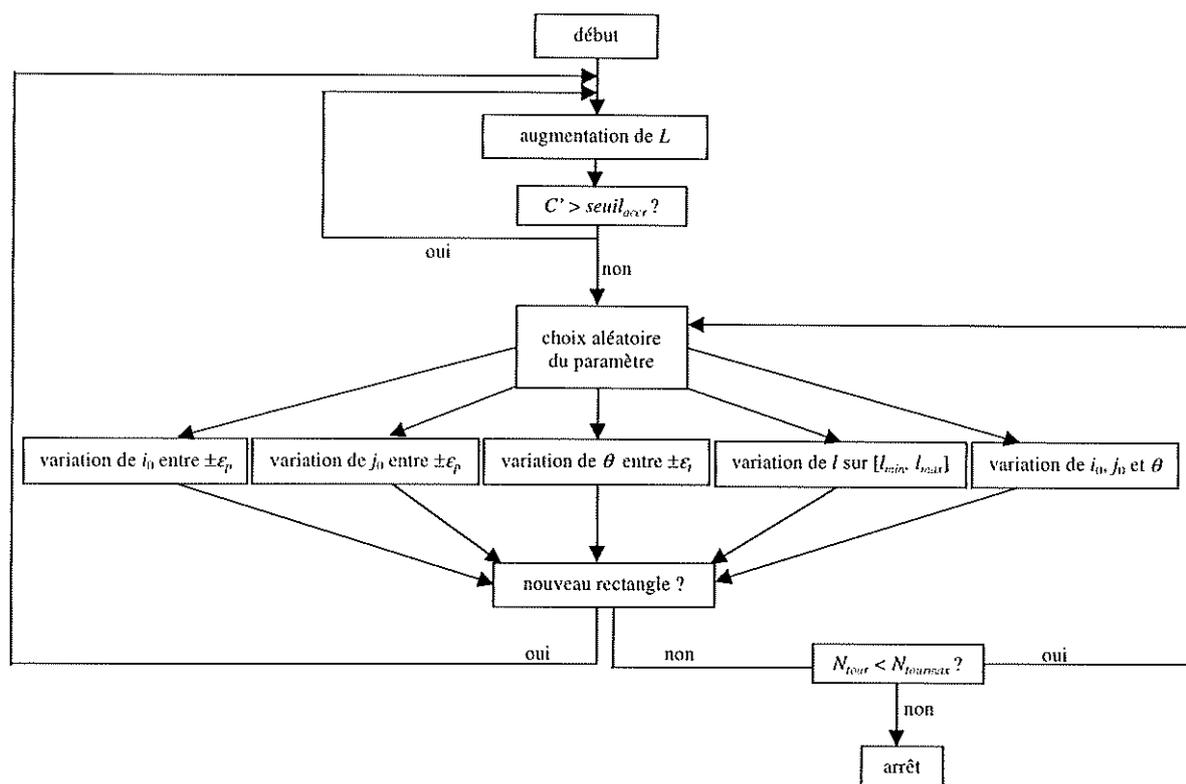


figure 3-37 : mécanisme de la méthode séquentielle

IV.4. Résultats sur les bâtiments

Nous testons l'AROCS-AG et l'AROCS-OS pour le critère binaire sur la vue 1, zone C (figure 1-22), la vue 2 de la zone D (figure 1-23). On observe sur les figures 3-38 et 3-39 que l'AROCS-OS fournit des résultats visuellement plus satisfaisants qu'avec l'AROCS-AG. En effet, il y a moins d'erreurs d'estimation de longueurs, moins d'erreurs d'interprétation de la scène (connexion de deux bâtiments différents) et les orientations semblent plus précises. Nous proposons une évaluation qualitative de ces résultats en dénombrant grossièrement le nombre de longueurs estimées trop longues et trop courtes. Les longueurs trop longues correspondent au cas où le rectangle s'est positionné sur des échos forts issus d'autres structures linéaires. Ces erreurs sont donc essentiellement dues à la densité d'échos forts. Les erreurs de longueurs trop courtes peuvent s'expliquer par trois raisons :

- 1) l'algorithme stochastique n'a pas réussi à positionner correctement le rectangle et l'accroissement de longueur n'a pas pu avoir lieu,
- 2) l'image présente une densité d'échos forts qui ne permet pas de différencier la forme du fond,
- 3) l'écho est trop faible.

Les deux premières explications sont inhérentes à l'algorithme (méthode d'optimisation et modélisation du problème). La dernière est intrinsèque à l'image.

Les mesures effectuées sont résumées pour les quatre résultats du tableau 3-7. Les chiffres reportés nous confirment que l'AROCS-OS aboutit à des résultats de meilleure qualité. La comparaison entre l'OS et l'AG doit cependant être nuancée. Avec une plus grande population et plus d'itérations, l'AG

aboutirait sans doute à de meilleurs résultats. Ainsi, le nombre de longueurs trop courtes est similaire pour les deux méthodes. La différence réside surtout sur le nombre de longueurs estimées trop longues. En proportion, nous pouvons conclure que les longueurs sont généralement bien estimées et les erreurs d'interprétation limitées, en particulier avec l'AROCS-OS. Cette extraction est alors tout à fait exploitable pour la restitution des empreintes des bâtiments.

image	méthode	nb de croix initiales	nb de longueurs détectées	nb de longueurs trop courtes				nb de longueurs trop longues	total d'erreurs	% erreurs
				raison 1	raison 2	raison 3	total			
vue 1 zone C figure 3-38	AG	140	351	5	21	16	42	14	56	16
	OS		348	10	20	13	43	2	45	13
vue 2 zone D figure 3-39	AG	74	183	6	2	4	12	19	31	17
	OS		189	4	2	7	13	6	19	13

tableau 3-7 : évaluation qualitative des résultats de l'AROCS-AG et l'AROCS-OS sur les bâtiments

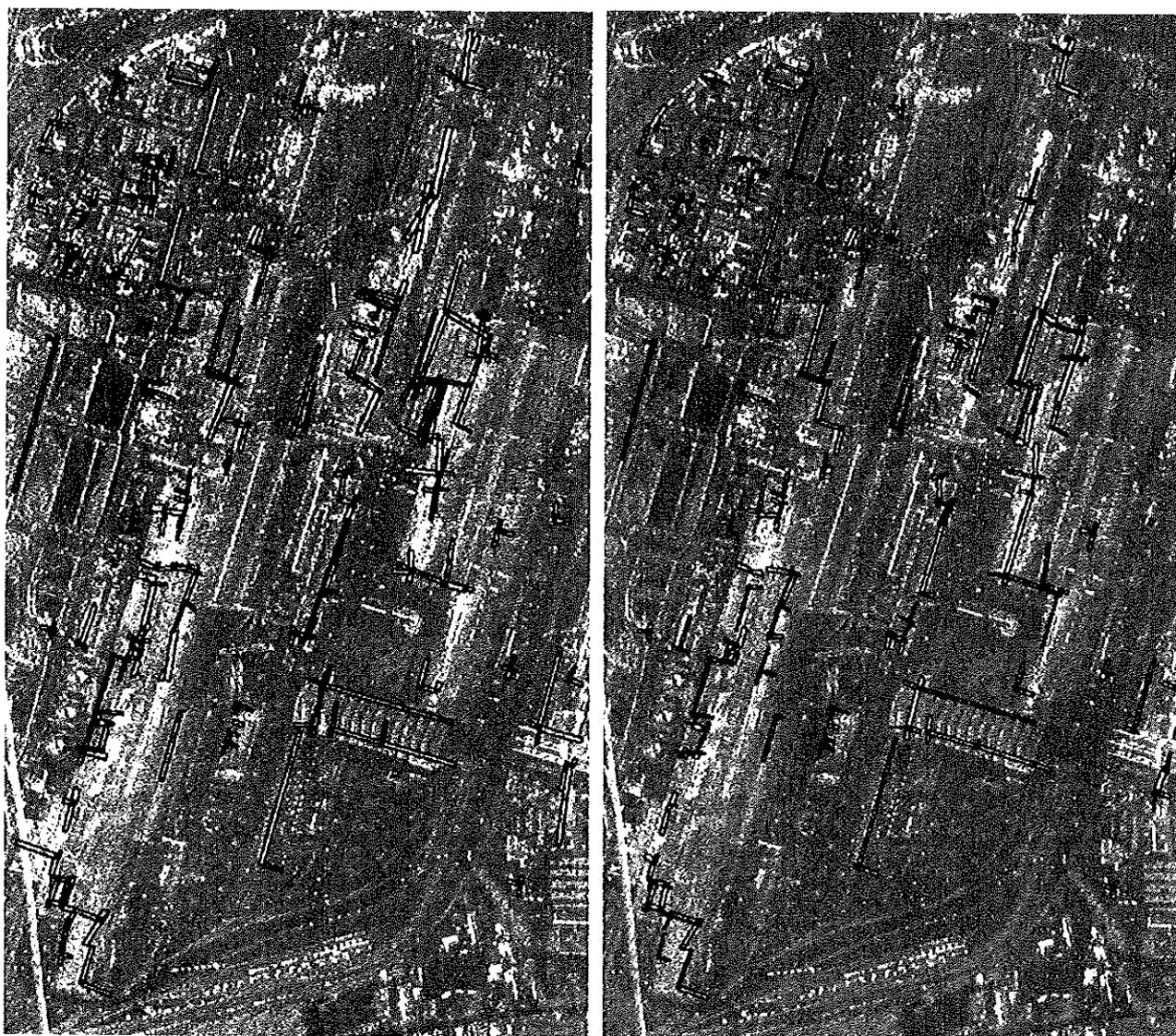


figure 3-38 : résultats par l'AROCS-AG et l'AROCS-OS pour la vue 1 en bande S de la zone C (figure 1-22), critère binaire

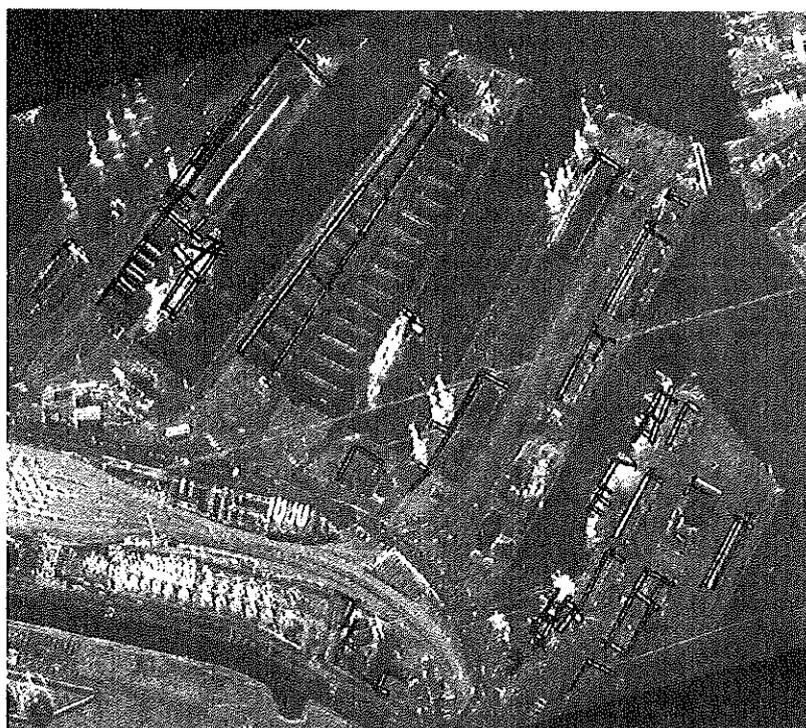
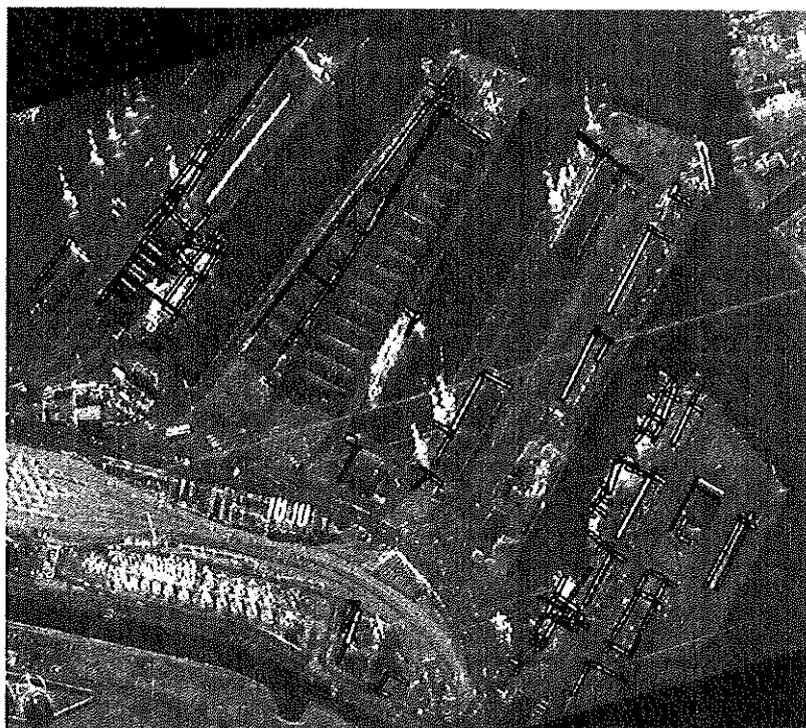


figure 3-39 : résultats par l'AROCS-AG et l'AROCS-OS pour la vue 2 en bande X de la zone C (figure 1-23), critère binaire

IV.5. Conclusion sur les bâtiments

Nous nous sommes intéressés à l'extraction des arrangements d'échos forts des bâtiments formant un 'L'. Pour cela, un algorithme en deux étapes a été proposé : la détection de croix à l'intersection de

lignes brillantes par TH locale puis la recherche des extrémités des segments de chaque côté des croix par l'AROCS. Cette méthode permet de déterminer le meilleur rectangle englobant la ligne d'échos forts sur un côté de la croix. Deux approches d'optimisation des paramètres ont été développées : par AG et par une méthode stochastique séquentielle, notée OS.

L'étape de détection par TH est fiable et performante sur les grands bâtiments et la majorité des bâtiments de taille moyenne formant un 'L' brillant. Lors de la reconnaissance, les deux causes principales d'erreurs sur l'estimation de la longueur proviennent d'un écho trop faible et de la densité d'échos forts dans le fond. Sinon, l'estimation des longueurs semble précise et une empreinte grossière des bâtiments détectés pourra alors être produite. La méthode séquentielle d'optimisation du critère a abouti à de meilleurs résultats que l'AG. Cependant nous pensons que l'AG pourra être aussi performant avec une population plus grande.

Notons enfin que, contrairement à la reconnaissance des demi-couronnes, celle des rectangles nécessite le choix d'un seuil déterminant contrôlant l'accroissement de longueur. Il traduit le compromis entre densité d'échos forts dans la forme et distance entre deux bâtiments alignés.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode d'extraction des structures brillantes en forme de demi-couronnes pour les cuves et de 'L' pour les bâtiments. La plupart de ces échos sont susceptibles de correspondre aux échos doubles recherchés.

Nous avons tout d'abord vérifié que ces formes peuvent être extraites sur les images géoréférencées sur un plan d'altitude constante. Ceci est possible en prenant en compte une épaisseur de l'écho mais ne reste pas valable à de très hautes résolutions ou lorsque le côté de la structure est très long et orienté selon une direction proche de celle de la visée. Dans ce cas, l'extraction d'ellipses et de droites devra être effectuée sur l'image radar.

Un masque binaire sur les structures brillantes est produit par fusion de la classification avec la détection des structures brillantes linéaires et circulaires. Les masques obtenus fournissent une information pertinente pour l'extraction des formes recherchées.

Pour les cuves, deux algorithmes de transformée de Hough (TH) circulaire, 3-D et 2-D, ont été implantés pour détecter des arcs de cercles épais. Par le biais d'images simulées contenant une demi-couronne brillante, les performances des méthodes ont pu être estimées. Il est apparu que l'algorithme de TH 3-D est approprié à la détection d'objets dont on connaît un ordre de grandeur de la taille. La TH 2-D permet la recherche d'objets de taille variée mais se révèle sensible à certains seuils sur images réelles.

L'algorithme de reconnaissance de forme par optimisation d'un critère surfacique (AROCS) est proposé pour s'affranchir du choix difficile de seuils déterminants, pour extraire des objets de taille différente et exploiter les différences radiométriques entre le sol et les échos forts. Cette approche repose sur une initialisation puis la recherche de la forme englobant la structure brillante avec ses irrégularités. La forme retenue est celle qui optimise un critère, calculé entre la forme et le fond représenté par la boîte englobante. L'évaluation de l'AROCS sur les images simulées montre que cette méthode atteint des performances de détection meilleures en moyenne et comparables en écart-type à la TH 2-D. Plusieurs critères ont été testés : des critères binaires mesurant la densité des échos forts, des critères statistiques et un critère fondé sur les fonctions d'appartenance. Le critère statistique basé sur l'homogénéité du fond et la différence des moyennes entre la forme et le fond, se révèle être le meilleur d'après les mesures de performance.

La complexité de calcul de l'AROCS étant conséquente, nous avons choisi une optimisation stochastique du critère par algorithme génétique (AG) et vérifié que la capacité de l'AROCS-AG rejoint celle de la méthode avec optimisation exhaustive.

Sur images réelles, les performances sont cohérentes avec les mesures réalisées pour le critère binaire et le critère fondé sur les fonctions d'appartenance. Par contre, le critère statistique ne donne pas de bons résultats. Cette contradiction avec les mesures précédentes est sans doute liée à la modélisation non parfaite des zones à forte densité d'échos forts par une loi Lognormale qui est néanmoins utilisée pour les simulations. Les résultats pour les deux autres critères montrent que les ambiguïtés dues à la proximité des objets sont en partie résolues grâce à la prise en compte du fond. L'algorithme parvient ainsi à fournir des rayons précis pour les petites et les grandes cuves, lorsque l'écho est assez fort et que la densité d'échos forts n'empêche pas de distinguer le fond de la forme.

Le traitement des 'L' sur les bâtiments s'appuie sur l'étude des cuves. Un algorithme de TH est utilisé pour détecter des lignes brillantes sur les masques binaires. L'algorithme global fournit la direction privilégiée des bâtiments dans la scène, si elle existe. L'algorithme local permet de détecter les croix formées par les intersections de lignes d'échos forts. Ces croix servent d'initialisation à l'AROCS, étendu à la reconnaissance du rectangle englobant la ligne d'échos forts. Ce rectangle est recherché de chaque côté de la croix par optimisation du critère. L'optimisation est stochastique utilisant les AG ou une méthode séquentielle stochastique (OS). D'après l'évaluation qualitative des résultats sur images réelles, la seconde technique paraît préférable. Les longueurs semblent estimées de façon précise lorsque l'écho reste suffisamment distinct de la texture du sol et n'est pas situé dans un amas d'échos forts.

Nous concluons que l'AROCS a permis d'extraire les formes recherchées malgré les irrégularités le long des structures brillantes et de résoudre certaines ambiguïtés d'interprétation de la scène en prenant en compte un fond dans le voisinage. Les limitations lors de l'initialisation sont essentiellement dues aux 'non-vus'. La reconnaissance échoue lorsque le fond et la forme ont les mêmes propriétés radiométriques, c'est-à-dire si l'écho est trop faible ou si la densité des échos forts est trop importante dans le fond. Par ailleurs, le traitement de scènes contenant les deux types d'objets, demi-couronnes et 'L', n'a pas été prévu. La détection des bâtiments étant plus discriminante que celle des cuves, l'extraction des bâtiments pourra être réalisée en premier. De plus, en stéréoscopie, l'utilisation conjointe des deux images doit permettre de limiter les fausses alarmes lors de l'initialisation.

La méthode proposée a permis d'extraire des formes suffisamment précises pour pouvoir fournir une empreinte grossière des structures et être utilisée dans la chaîne radargrammétrique. Le chapitre 4 suivant traite alors de l'extraction stéréoscopique des structures et de l'estimation du 3-D.

Chapitre 4 : Estimation du 3-D par stéréoscopie

Nous présentons dans ce chapitre la mise en œuvre de l'approche proposée à la fin du chapitre 2 pour la construction de MNE par stéréoscopie sur les cuves ou les bâtiments. Elle se décompose en deux étapes principales : l'extraction des structures en stéréoscopie et l'extraction du 3-D. Ce dernier chapitre s'appuie donc sur le chapitre 3 pour la première étape et sur le chapitre 2 pour la seconde. Comme pour l'extraction des structures, nous traitons soit des scènes de cuves, soit des scènes de bâtiments. La chaîne de traitement est cependant la même dans les deux cas, c'est pourquoi la distinction ne sera faite qu'au niveau de l'application sur les images réelles.

Tout d'abord, une étude préliminaire est menée pour choisir la fonction de corrélation pour la mise en correspondance de points ou de primitives, la mieux adaptée à nos images.

La méthode d'extraction des structures présentée dans le chapitre 3 est ensuite étendue à la stéréoscopie. Les primitives d'initialisation (points d'accès et croix) sont appariées puis l'AROCs est utilisé simultanément sur les deux images géoréférencées pour restituer les demi-couronnes ou les 'L'. Des empreintes grossières sont alors produites pour chaque structure détectée.

L'extraction du 3-D comprend la recherche des altitudes du sol entre les structures et des hauteurs des structures extraites. Les altitudes du sol sont obtenues par mise en correspondance dense des images sur les pixels non échos forts et hors des empreintes des objets détectés. La hauteur des objets est recherchée localement. Comme la majorité des structures brillantes extraites correspondent aux échos doubles, le calcul stéréoscopique sur ces pixels fournit l'altitude du sol. Une méthode de mesure des hauteurs des structures est donc présentée. Elle repose sur la combinaison d'informations stéréoscopiques et monoscopiques dans le cas favorable où un écho du toit est détectable.

Cette chaîne de traitement est appliquée sur plusieurs couples stéréoscopiques RAMSES : le premier d'images de cuves en bande S et les suivants sur une scène de bâtiments industriels en bande S et X.

I. Présentation de l'approche

Le synoptique sur la figure 4-1 résume la chaîne de traitements proposée pour construire le MNE. Elle se décompose en deux grandes parties : l'extraction des structures et l'extraction du 3-D.

L'extraction des structures est effectuée sur les images géoréférencées. Comme dans le cas monoscopique présenté dans le chapitre 3, l'objectif est d'extraire les demi-couronnes et les 'L' brillants. Cette étape commence alors par la création du masque binaire et la détection des primitives d'initialisation (points d'accès ou croix) sur chacune des deux images. Deux approches sont ensuite possibles :

- l'extraction par l'AROCS sur les deux images des demi-couronnes puis la mise en correspondance des deux ensembles de demi-couronnes et de 'L',
- la mise en correspondance des primitives d'initialisation (points d'accès ou croix) puis l'extraction simultanée sur les deux images.

La seconde approche est choisie pour plusieurs raisons :

- la mise en correspondance des primitives d'initialisation permet de supprimer des fausses alarmes,
- on obtient un même ensemble d'objets sur les deux images,
- l'extraction simultanée sur les deux images est plus robuste que celle sur une seule image.

Pour l'extraction stéréoscopique des objets cylindriques, la méthodologie est la suivante :

- l'appariement des primitives d'initialisation, les points d'accès, par programmation dynamique,
- l'extraction stéréoscopique : dans cette étape, les demi-couronnes sont recherchées sur les deux images simultanément par l'AROCS étendu à la stéréoscopie.

Pour l'extraction des objets parallélépipédiques, une étape supplémentaire est ajoutée pour prendre en compte le fait que certaines croix, entre l'écho double et l'écho du bord du toit, ne correspondent pas à un point réel sur le terrain (cf. chapitre 3). En effet, si l'une de ces croix est appariée, l'estimation stéréoscopique de la longueur sera fautive. Pourtant un tel appariement peut avoir lieu suivant l'orientation du bâtiment, sa hauteur et le domaine de recherche des correspondants. La sélection des croix candidates à l'appariement est donc nécessaire. Pour cela, nous procédons de la façon suivante :

- l'estimation des longueurs des segments sur chaque image : les extrémités des segments depuis les quatre côtés d'une croix sont recherchées par l'AROCS,
- la décision : les disparités puis les altitudes sont calculées le long des quatre segments d'une croix. La croix est valide si les quatre altitudes sont similaires.
- l'appariement des primitives d'initialisation candidates : les croix sélectionnées sont appariées par programmation dynamique,
- l'affinage stéréoscopique : les rectangles sont affinés sur les deux images simultanément par l'AROCS étendu à la stéréoscopie.

Les empreintes grossières des structures détectées peuvent alors être construites. Elles sont utilisées pour contraindre le calcul des altitudes du sol ou des structures.

L'extraction du 3-D concerne tout d'abord la construction du MNT. Pour cela, les images sont rectifiées en géométrie épipolaire puis mises en correspondance par un algorithme dense. Les échos forts ne participent pas à l'appariement car on ne sait pas s'ils sont au sol ou élevés. Les autres points, même s'ils sont sur des toits, ne sont pas gênants. Pour obtenir le MNT, les altitudes sont calculées à partir de la carte des disparités restreinte aux pixels hors des empreintes des objets détectés. Les valeurs aberrantes sont ensuite supprimées puis le MNT est interpolé. Pour les structures 3-D, nous calculons par stéréoscopie la localisation planimétrique et les altitudes des demi-couronnes et des rectangles extraits. Le MNT permet alors de décider si l'objet est au sol ou élevé. La hauteur d'une structure est alors recherchée à partir de plusieurs informations : les altitudes le long des formes extraites, les altitudes fournies par la carte des disparités déjà calculée pour les pixels situés dans les empreintes des objets et une mesure monoscopique.

Rappelons les différentes géométries qui interviennent dans la suite des traitements :

- la géométrie radar dans laquelle sont faits tous les calculs de localisation,
- la géométrie terrain où est réalisée l'extraction des structures,
- la géométrie épipolaire dans laquelle sont appariés les primitives et les pixels au sol.

En pratique, des grilles de passage d'une géométrie à l'autre sont créées en début de la chaîne de traitement.

Nous détaillons ci-dessous chacune de ces étapes. Une étude préliminaire est proposée pour choisir la fonction de corrélation intervenant dans la mise en correspondance des primitives et des points (section II).

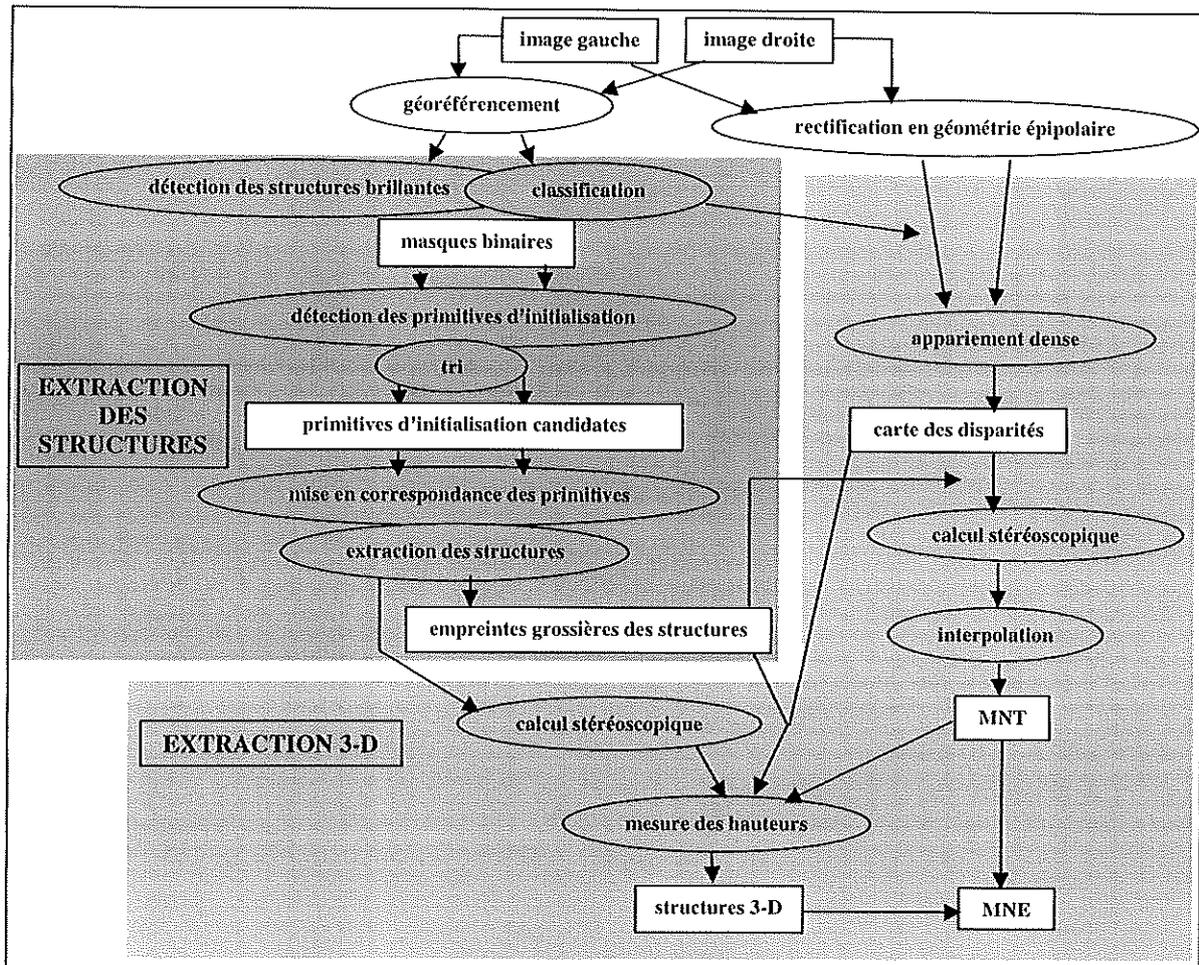


figure 4-1 : synoptique de la chaîne de traitements conduisant au MNE. Les ovales représentent les traitements et les cadres correspondent à des résultats

II. Choix de la fonction de similarité

L'objectif de cette analyse est de décider quel corrélateur utiliser pour l'appariement des images RAMSES sans filtrage : un corrélateur classique ou un corrélateur adapté au radar. La problématique est la suivante : on cherche à appairer un pixel p de l'image gauche I_1 avec un pixel de l'image droite I_2 . Soit δ le décalage spatial entre le point gauche et son correspondant potentiel. Selon le critère choisi, la fonction de mise en correspondance, C , doit vérifier :

$$\delta_{vrai} = \arg \max_{\delta} C(\delta) \text{ ou } \delta_{vrai} = \arg \min_{\delta} C(\delta)$$

II.1. Fonctions de corrélation

II.1.1. Corrélateurs classiques

Les fonctions de corrélation usuelles sont :

- la corrélation centrée sur les différences :

$$C(\delta) = \frac{\text{diff}(I_{1,p} - \mu_{I_{1,p}}, I_{2,p+\delta} - \mu_{I_{2,p+\delta}})}{\sqrt{\text{var}(I_{1,p}) \cdot \text{var}(I_{2,p+\delta})}} \quad \text{éq. 4-1}$$

avec :

$$\text{diff}(I_{1,p} - \mu_{I_{1,p}}, I_{2,p+\delta} - \mu_{I_{2,p+\delta}}) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (i_{1,l} - i_{2,l})^2 - (\mu_{I_{1,p}} - \mu_{I_{2,p+\delta}})^2$$

$$\text{var}(I_{1,p}) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N i_{1,l}^2 - \mu_{I_{1,p}}^2 \quad \text{et} \quad \text{var}(I_{2,p+\delta}) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N i_{2,l}^2 - \mu_{I_{2,p+\delta}}^2$$

N la taille de la fenêtre de corrélation

- la corrélation centrée sur les covariances, correspondant au coefficient de corrélation :

$$C(\delta) = \frac{\text{cov}(I_{1,p}, I_{2,p+\delta})}{\sqrt{\text{var}(I_{1,p}) \cdot \text{var}(I_{2,p+\delta})}} \quad \text{éq. 4-2}$$

avec :

$$\text{cov}(I_{1,p}, I_{2,p+\delta}) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N i_{1,l} \cdot i_{2,l} - \mu_{I_{1,p}} \cdot \mu_{I_{2,p+\delta}}$$

- la corrélation des rangs : cette fonction limite l'influence de pics d'intensités dans un voisinage. La corrélation des rangs de Spearman [SAPORTA90] se calcule par le coefficient de corrélation sur les classements des valeurs des pixels des voisinages gauche et droit :

$$C(\delta) = \frac{\text{cov}(CI(I_{1,p}), CI(I_{2,p+\delta}))}{\sqrt{\text{var}(CI(I_{1,p})) \cdot \text{var}(CI(I_{2,p+\delta}))}}$$

avec : $CI(I_{1,p})$ et $CI(I_{2,p+\delta})$ les classements sur les voisinages gauche et droit.

Les rangs étant des permutations sur $[1, N]$, l'expression du critère se simplifie en :

$$C(\delta) = 1 - \frac{3 \sum_{k=1}^N D_k^2}{N \cdot (N^2 - 1)}, \quad \text{avec } D_k \text{ différence de rang du pixel } k \text{ entre les classements} \quad \text{éq. 4-3}$$

II.1.2. Corrélateurs spécifiques en radar

Nous exposons deux corrélateurs proposés en radar : l'estimation du coefficient de corrélation par MV ou MM et le calcul du maximum de la probabilité que les deux pixels se correspondent.

II.1.2.1. Estimation du coefficient de corrélation (Lemaréchal [HERVET00])

La fonction de mise en correspondance est donnée par le coefficient de corrélation entre les deux images : $C(\delta) = \rho_\delta$. La méthode consiste à exprimer la densité de probabilité bidimensionnelle conditionnellement au coefficient de corrélation, $p(i_{1,i}, i_{2,i} / \rho)$, puis estimer le coefficient de corrélation par MV ou MM. Dans le cas d'un bruit Gamma multiplicatif, la loi bidimensionnelle Gamma s'écrit pour $L_1 = L_2 = L$:

$$p(i_{1,i}, i_{2,i} / \rho) = \frac{1}{\mu_{1,r} \mu_{2,r+\delta} \rho^{L-1} \sqrt{1-\rho^2} \Gamma(L)} \left(\frac{i_{1,i} i_{2,i}}{\mu_{1,r} \mu_{2,r+\delta}} \right)^{L-1} \exp \left(-\frac{1}{1-\rho^2} \left(\frac{i_{1,i}}{\mu_{1,r}} + \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,r+\delta}} \right) \right) I_{L-1} \left(\frac{2\rho}{1-\rho^2} \sqrt{\frac{i_{1,i} i_{2,i}}{\mu_{1,r} \mu_{2,r+\delta}}} \right)$$

avec I_{L-1} la fonction de Bessel modifiée de première espèce.

L'estimation MV du coefficient de corrélation est complexe et la solution s'obtient par des méthodes de calculs numériques (méthode de Brent). Une seconde approche consiste à calculer le coefficient de corrélation entre réflectivités sous-jacentes de loi Gamma. La loi bidimensionnelle des intensités conditionnellement au coefficient de corrélation entre réflectivités est calculée par marginalisation. La solution MV contient alors des rapports de sommes infinies et doit être également calculée par une méthode numérique. La solution MM est plus simple, proche de l'éq. 4-1. E. Hervet [HERVET00] constate que la corrélation sur les réflectivités n'a pas abouti à de meilleurs résultats par rapport à la corrélation sur les intensités pour des images RADARSAT. Dans notre cas, mono-vue et haute résolution, le modèle multiplicatif n'est pas valide en présence d'échos forts. La corrélation sera donc effectuée sur les intensités. Les résultats d'E. Hervet montrent que la précision du MNT est meilleure avec ce corrélateur et un appariement par recherche tabou que par filtrage des images puis appariement basé sur le coefficient de corrélation avec un algorithme de mise en correspondance classique.

II.1.2.2. Maximum de la probabilité de correspondance [NOCERA96]

L. Nocéra ne parle pas de réflectivités mais d'un seul signal utile à l'origine des deux images bruitées, R . Localement, R correspond à la moyenne des intensités. Les deux images sont supposées indépendante et les pixels voisins décorrélés. Dans le cas Gamma, on a :

$$P(I_{1,p}, I_{2,p+\delta} / R, \delta) = \prod_{i=1}^N p(i_{1,i}, i_{2,i} / r_i, \delta) \text{ avec } p(i_{1,i}, i_{2,i} / r_i, \delta) = \frac{L_1^{L_1} L_2^{L_2}}{\Gamma(L_1) \Gamma(L_2)} \frac{i_{1,i}^{L_1-1} i_{2,i}^{L_2-1}}{r_i^{L_1} r_i^{L_2}} \exp \left(-\left(L_1 \frac{i_{1,i}}{r_i} + L_2 \frac{i_{2,i}}{r_i} \right) \right)$$

Les deux points se correspondent au maximum de cette probabilité. L. Nocéra calcule le maximum de la moyenne géométrique de cette probabilité quelles que soient les réflectivités :

$$C(\delta) = \int_R P(I_{1,p}, I_{2,p+\delta} / R, \delta) dR$$

Le calcul aboutit au critère d'expression suivante pour $L_1 = L_2 = L$:

$$C(\delta) = \prod_{i=1}^N \frac{\Gamma(2L-1)}{L\Gamma(L)^2} \frac{i_{1,i}^{L-1} i_{2,i}^{L-1}}{(i_{1,i} + i_{2,i})^{2L-1}}$$

L. Nocéra teste sa fonction de corrélation sur des images cinq vues. Il conclut que pour des fenêtres de grande taille, la corrélation gaussienne est plus discriminante tandis que les deux fonctions ont les mêmes effets pour des fenêtres plus petites (inférieures à 10 pixels).

Nous proposons de calculer le critère pour $L_1 \neq L_2$ et un signal différent pour les deux images mais relié par un facteur de proportionnalité :

$$\text{si } R = R_{1,p} = bR_{2,p+\delta} \text{ avec } b = \mu_{1,p} / \mu_{2,p+\delta} \text{ alors}$$

$$C(\delta) = \prod_{i=1}^N \frac{L_1 L_2 \Gamma(L_1 + L_2 - 1) \left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} \right)^{L_1-1} \left(L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right)^{L_2-1}}{\Gamma(L_1) \Gamma(L_2) \mu_{1,p} \mu_{2,p+\delta} \left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} + L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right)^{L_1+L_2-1}}$$

Nous normalisons ce critère. Pour cela, on calcule :

$$C_{\text{normalisé}}(I_{1,p}, I_{2,p+\delta}) = \frac{C(I_{1,p}, I_{2,p+\delta})}{\sqrt{C(I_{1,p}, I_{1,p})} \sqrt{C(I_{2,p+\delta}, I_{2,p+\delta})}}$$

On obtient :

$$C(\delta) = \prod_{i=1}^N \frac{2^{L_1+L_2-1} \Gamma(L_1 + L_2 - 1)}{\sqrt{\Gamma(2L_1 - 1)} \sqrt{\Gamma(2L_2 - 1)}} \sqrt{b} \frac{\left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} \right)^{L_1-1/2} \left(L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right)^{L_2-1/2}}{\left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} + L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right)^{L_1+L_2-1}}$$

Nous utilisons un critère réduit sous sa forme logarithmique. Pour éviter tout problème, les pixels nuls ne seront pas considérés. Ils sont très rares voire inexistantes sur nos images puisque la probabilité d'avoir un pixel nul pour des lois Gamma et Lognormale est nulle. Finalement :

$$\ln C(\delta) = N \left[\ln(\Gamma(L_1 + L_2 - 1)) - \frac{1}{2} \ln(\Gamma(2L_1 - 1)) - \frac{1}{2} \ln(\Gamma(2L_2 - 1)) + (L_1 + L_2 - 1) \ln 2 \right] +$$

$$\sum_{i=1}^N \left[\left(L_1 - \frac{1}{2} \right) \ln \left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} \right) + \left(L_2 - \frac{1}{2} \right) \ln \left(L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right) - (L_1 + L_2 - 1) \ln \left(L_1 \frac{i_{1,i}}{\mu_{1,p}} + L_2 \frac{i_{2,i}}{\mu_{2,p+\delta}} \right) \right] \quad \text{éq. 4-4}$$

II.2. Comparaison des corrélateurs pour les images RAMSES

La corrélation gaussienne demeure la fonction de similarité la plus utilisée. En effet, les images basse résolution sont généralement multi-vue, ce qui a pour effet de faire tendre la loi des images radar vers une gaussienne. Pour savoir quel corrélateur utilisé, nous proposons de comparer les comportements de six fonctions sur un couple d'images RAMSES.

II.2.1. Critères testés

Nous retenons les six critères suivants :

- corrélation sur les différences (éq. 4.1),
- corrélation sur les covariances (éq. 4.2),
- corrélation sur les différences sur le logarithme des images,
- corrélation sur les covariances sur le logarithme des images,
- corrélation de rang (éq. 4.3),
- corrélation adaptée à la loi Gamma (éq. 4.4).

L'amplitude des images RAMSES peut être décrite par une loi Lognormale, de façon approximative sur les échos forts (cf. chapitre 1). Nous testons donc la corrélation classique sur les logarithmes des images. Le corrélateur Gamma est également testé car la distribution pour la classe du sol, qui regroupe souvent le plus de pixels, est presque aussi proche d'une loi Gamma que d'une loi Lognormale. Pour ce corrélateur, les nombres de vues équivalents sont évalués à partir des images classifiées sur la zone constituée des pixels n'appartenant pas à la classe des échos forts. Les images sont normalisées par la valeur maximale de l'intensité dans l'image.

II.2.2. Calcul de performance

Les performances sont estimées pour des fenêtres de corrélation de rayon allant de 1 à 30 sur environ 280 points saisis manuellement sur les routes et sur les échos forts ponctuels ou situés sur une structure brillante. Ces points ont été saisis sur un couple S-HH d'angle stéréoscopique de 30°. Les trois mesures suivantes sont réalisées :

- le pourcentage de bons appariements : un point est bien apparié s'il est retrouvé par algorithme aller-retour. Une erreur de 1 pixel en disparité est tolérée,
- la hauteur relative du pic principal par rapport aux pics secondaires (cf. chapitre 2, I.1.2.4). On note h_1 la hauteur du pic principal et h_2 celle du second pic, la mesure d'ambiguïté s'écrit : $1 - h_2/h_1$ pour $h_2 > 0.2h_1$. L'appariement est d'autant moins ambigu que cette mesure augmente,
- la largeur du pic principal (cf. chapitre 2, I.1.2.4). Nous supposons que le pic est modélisé par une gaussienne. La largeur est estimée par l'écart-type, ce qui revient à la mesurer à une hauteur de 60% du pic principal. Cette mesure indique l'imprécision de la mise en correspondance.

Les moyennes de ces mesures sont tracées en fonction du rayon. Nous nous intéressons aussi aux rapports moyens des mesures de hauteur et de largeur entre points bien appariés et points non appariés afin d'étudier la possibilité de choisir un seuil discriminant.

La figure 4-2 représente le pourcentage de pixels bien appariés en fonction du rayon. Ces courbes montrent que le pourcentage augmente avec la taille de la fenêtre de corrélation. On constate que le corrélateur sur les rangs n'est pas performant. Le corrélateur Gamma est moins efficace que les corrélateurs classiques. Pour ces derniers, 70% des points de type route sont bien appariés pour un rayon supérieur à 15 pixels. Pour les points de type spots, ce pourcentage est atteint dès un rayon de 5 pixels. De plus, la corrélation sur les images brutes semble plus adaptées que celle sur les logarithmes.

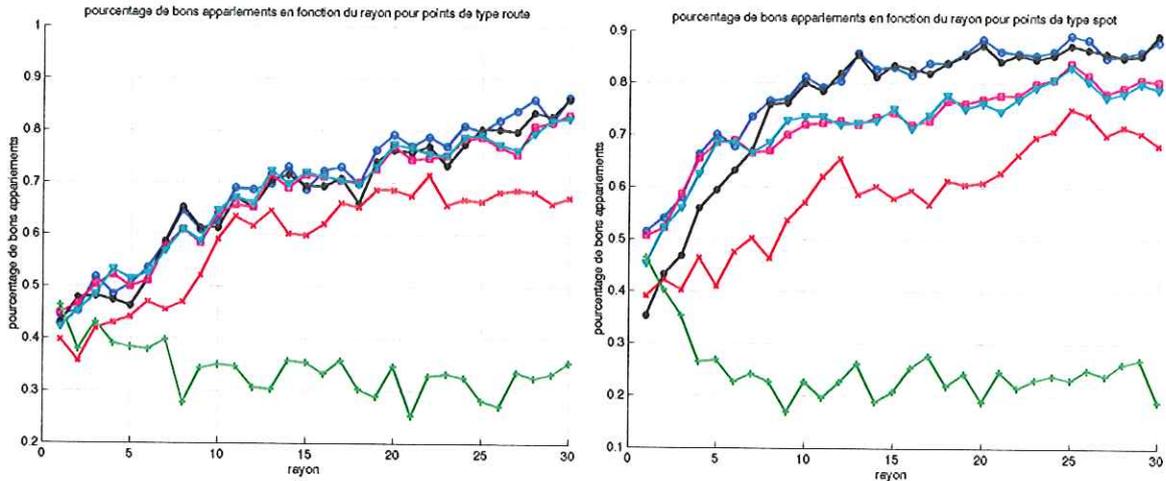


figure 4-2 : pourcentage de points appariés en fonction du rayon pour les points de type route et spots. Légende : ‘*’=corrélation sur les différences (noir), ‘o’=corrélation sur les covariances (bleu), ‘□’=corrélation sur les différences sur les logarithmes (rose), ‘▽’= corrélation sur les covariances sur les logarithmes (turquoise), ‘+’=corrélation de rang (vert), ‘x’=corrélation Gamma (rouge)

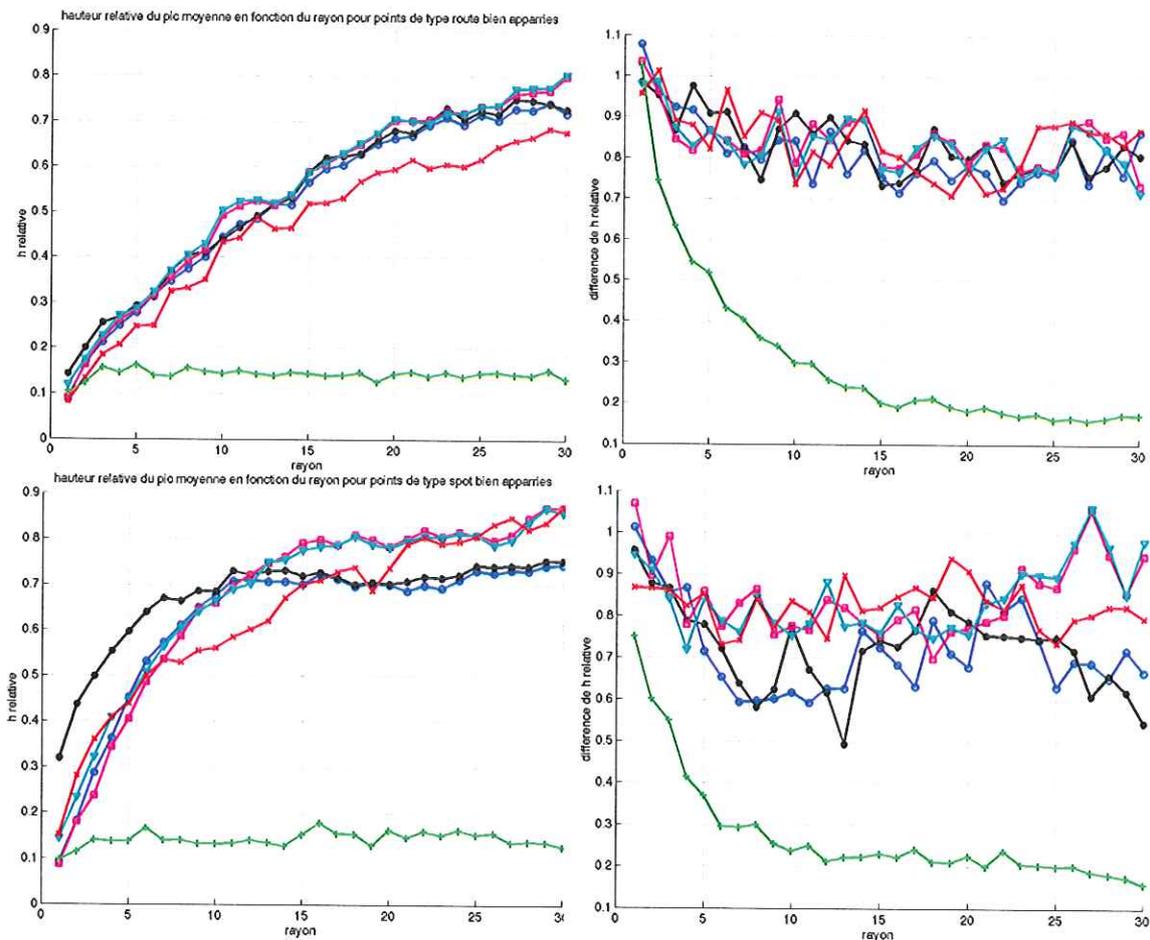


figure 4-3 : courbes en fonction du rayon pour les points de type route (première ligne) et les points de type spot (deuxième ligne). De gauche à droite : hauteur relative moyenne pour les points bien appariés, rapport des hauteurs relatives moyennes entre points bien appariés et les autres. Même légende que sur la figure 4-2.

Les courbes des figures 4-3 et 4-4 représentent les valeurs moyennes des mesures d'ambiguïté et de précision en fonction du rayon, pour les points bien appariés, ainsi que le rapport entre mesures moyennes pour les points bien appariés et les autres. L'ambiguïté diminue régulièrement en fonction du rayon et plus rapidement pour les points de type spots. L'imprécision croît fortement avec le rayon pour les points de type route, jusqu'à un rayon d'environ 7 pixels. Au-delà, elle reste constante ou diminue. Pour les points de type spot, l'imprécision augmente régulièrement. Ces largeurs sont entre 2 et 4 pixels. Par conséquent, l'ambiguïté diminue avec l'accroissement du rayon mais l'imprécision augmente. Les rapports entre mesures (largeur, hauteur relative) entre points bien appariés et points mal appariés oscillent autour de 80%, sauf pour la corrélation de rang. Les courbes sont cependant fortement bruitées, sans doute à cause de la taille réduite de l'échantillon. Il paraît difficile d'en extraire un seuil pour différencier les deux types de points, bien appariés et mal appariés. Par contre, on note que le rayon doit être supérieur à 5 pixels pour observer des rapports inférieurs à 1 pour ces deux mesures.

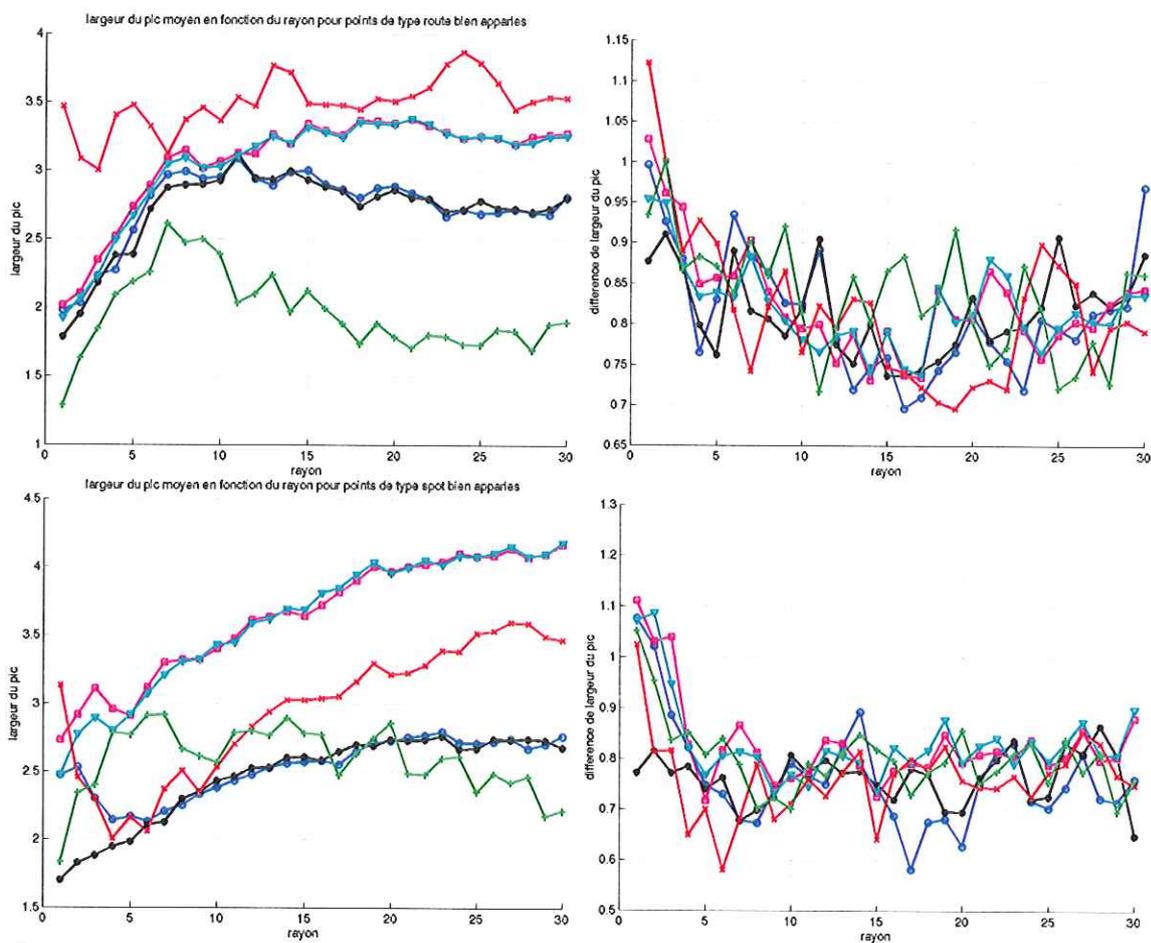


figure 4-4 : courbes en fonction du rayon pour les points de type route (première ligne) et les points de type spot (deuxième ligne). De gauche à droite : largeur moyenne pour les points bien appariés, rapport des largeurs moyennes entre points mal appariés et points bien appariés. Même légende que sur la figure 4-2.

II.3. Conclusion de l'analyse sur les corrélateurs

La fonction de corrélation basée sur les différences ou les covariances ressort comme la plus adaptée pour nos images. L'étude menée nous permet aussi de choisir un seuil global pour supprimer les faux appariements sur les coefficients de corrélation : le seuil est choisi tel que 70 ou 80% des points appariés soient conservés. Un seuil fiable sur les hauteurs relatives et les largeurs de pics ne peut pas être déterminé à partir de ces courbes qui sont assez bruitées. Enfin, un rayon d'au moins 5 pixels est requis pour l'appariement de points sur nos images.

III. Extraction des structures en stéréoscopie

De même qu'en monoscopie, les images sont géoréférencées et les deux masques binaires sont créés. Les primitives d'initialisation (croix et points d'accès) sont détectées sur chaque image séparément. Nous présentons dans cette section la méthode de sélection des croix candidates à l'appariement, leur mise en correspondance et l'extension de l'AROCS à la stéréoscopie. Les empreintes grossières sont ensuite créées sur chaque objet détecté.

III.1. Sélection des primitives candidates à l'appariement

Tous les points d'accès sont candidats à l'appariement. Par contre, certaines croix sont entre l'écho du toit et l'écho double et ne correspondent pas à un point du sol (cf. chapitre 3). De telles croix ne doivent pas être appariées. Dans le paragraphe IV.2.3, nous verrons qu'elles peuvent par contre être utilisées lors de la mesure monoscopique de la hauteur d'un bâtiment. Nous proposons de réaliser les deux étapes suivantes sur chaque image séparément pour identifier ces croix : l'estimation des longueurs des segments puis la décision.

L'estimation des longueurs des segments depuis les quatre côtés d'une croix utilise l'AROCS en monoscopie.

La décision est prise par étude des altitudes des quatre rectangles extraits. Pour cela, les rectangles sont projetés dans l'image rectifiée en utilisant les grilles de passage. Les disparités des pixels inclus dans le rectangle sont calculées par algorithme de mise en correspondance. Cet algorithme est détaillé dans le paragraphe IV.1.1. Les altitudes moyennes sur chaque côté d'une croix sont ensuite estimées par calcul stéréoscopique. Une croix est candidate à l'appariement si la différence d'altitudes sur deux côtés perpendiculaires est inférieure à un seuil. Dans le cas contraire, la croix appartient à des segments d'altitudes différentes. Le seuil est choisi proportionnellement au pouvoir stéréoscopique du couple d'images, évalué dans le chapitre 2 (II.5).

III.2. Appariement des primitives d'initialisation

Dans notre cas, les visées sont de même côté et les trajectoires parallèles. Le sol est presque plat et nous nous intéressons aux murs verticaux. Les effets de repliements sont donc comparables dans la majorité des cas et les contraintes d'ordre et d'unicité peuvent donc être raisonnablement utilisées. Nous proposons donc d'apparier les primitives d'initialisation candidates par programmation dynamique [BAKER81]. Cette technique permet en effet de prendre en compte le critère de similarité, la contrainte d'ordre, l'unicité, la contrainte épipolaire et le domaine de recherche (cf. chapitre 2).

III.2.1. Principe de la mise en correspondance par programmation dynamique

Cette technique consiste à rechercher le chemin de coût minimum dans un graphe 2-D. Les nœuds du graphe représentent l'appariement de deux primitives et les arêtes portent le coût partiel, somme des coûts élémentaires d'appariement depuis le début du chemin (figure 4-5). Ces coûts élémentaires sont la traduction du critère de similarités.

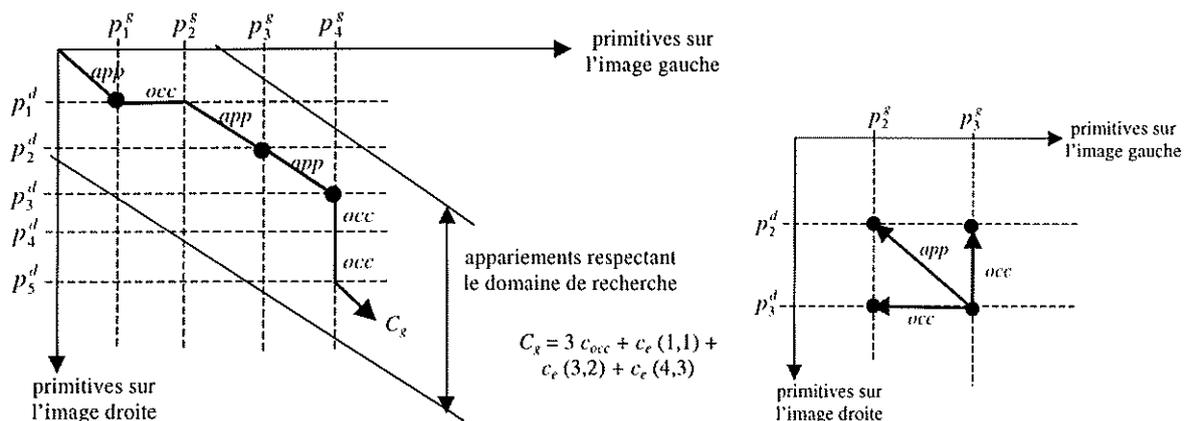


figure 4-5 : mécanisme de la mise en correspondance par programmation dynamique : exemple de chemin sur le graphique à gauche et méthode d'exploration sur le graphique à droite

Dans ce graphe, l'appariement correspond à un chemin oblique. Lorsqu'une primitive n'a pas de correspondant dans la seconde image, elle n'est pas appariée. Ceci se traduit par :

- un chemin horizontal dans le cas d'une primitive non appariée à droite (p_2^s n'a pas de correspondant à droite sur l'exemple de la figure 4-5),
- un chemin vertical dans le cas d'une primitive non appariée à gauche (p_4^d et p_5^d n'ont pas de correspondants à gauche sur l'exemple de la figure 4-5).

Dans ce cas, le coût élémentaire ajouté au coût partiel du chemin passant par ce nœud est un coût de non appariement.

En pratique, le coût partiel en un nœud est calculé d'après les coûts partiels portés par les arêtes arrivant sur ce nœud et correspondant aux trois possibilités : appariement, non appariement gauche ou non appariement droit (figure 4-5, schéma de droite). La liste des appariements est ensuite restituée par parcours inverse dans le graphe à partir du nœud terminal correspondant au chemin de coût minimal.

Ce formalisme permet de prendre en compte simplement les contraintes :

- les primitives des deux ensembles associés sont situées sur des lignes épipolaires homologues,
- les chemins possibles sont inclus dans une bande délimitant les appariements qui satisfont le domaine de recherche,
- le chemin avec retour en arrière est interdit ce qui assure le respect des contraintes d'ordre et d'unicité.

III.2.2. Application à l'appariement des primitives d'initialisation

L'appariement est réalisé soit pour les points d'accès sur les scènes de cuves, soit pour les croix sur les scènes de bâtiments. Notons que nous apparions les centres des croix. D'après ce qui précède (II.3), nous choisissons le coefficient de corrélation basé sur les différences pour définir le coût élémentaire d'appariement. En stéréovision, ce coût est souvent combiné avec un test sur la similarité des directions pour la mise en correspondance de segments. Dans notre cas, nous avons utilisé la direction privilégiée lors de la détection des croix, il n'est donc pas nécessaire d'inclure cette contrainte. Le même coût est alors utilisé pour les deux types de primitives, points et croix. Le coût de non appariement est fixé à la moyenne plus un écart-type, valeurs calculées sur les coûts élémentaires d'appariements potentiels.

Afin de prendre en compte la contrainte épipolaire, la mise en correspondance est effectuée sur des sous-groupes de primitives situées sur une même ligne épipolaire. La position des croix n'est pas exacte. Nous tolérons donc une erreur de quelques pixels sur la localisation de la primitive d'initialisation. En pratique, les primitives situées autour d'une ligne épipolaire sont appariées avec celles appartenant à la ligne conjuguée. Avec ce mécanisme, une primitive gauche est répétée dans plusieurs sous-groupes de primitives candidates. Elle peut donc être appariée plusieurs fois. Les primitives à droite ont par contre un seul correspondant à gauche. Pour avoir l'unicité des appariements, nous utilisons donc une approche 'aller-retour'.

III.3. Reconnaissance des formes en stéréoscopie

L'AROCS est utilisé simultanément sur les deux images à partir des primitives appariées. L'objectif de cette étape est d'affiner en stéréoscopie l'extraction monoscopique réalisée lors de la sélection des primitives candidates à l'appariement. Nous expliquons le procédé et vérifions une hypothèse utilisée lors de cette extraction, à savoir que la disparité est constante dans la forme sur les images géoréférencées.

III.3.1. Extension de l'AROCS au cas multi-image

Les primitives appariées servent d'initialisation à la méthode par AROCS proposée dans le chapitre 3. L'adaptation au cas stéréoscopique consiste à faire évoluer la forme simultanément sur les deux images à partir des primitives homologues. Le critère est calculé sur les pixels de la forme et du

fond des images gauche et droite confondues. Par exemple pour le critère binaire et dans le cas d'images géoréférencées au même pas, cela donne $CB1$. $CB2$ avec :

$$CB1 = \frac{1}{2N_1} \sum_{i \in 1} (w_i^s + w_i^d) \text{ et } CB2 = \frac{1}{2N_2} \sum_{i \in 2} [(1 - w_i^s) + (1 - w_i^d)],$$

$(w_i^s)_i$ le masque binaire à gauche et $(w_i^d)_i$ à droite,
 N_1 le nombre de pixel dans la forme et N_2 dans le fond.

Une autre possibilité aurait été de prendre la moyenne des critères calculés sur l'image gauche et sur l'image droite séparément. Comme dans le cas monoscopique, l'association des formes extraites, circulaires et rectangulaires, est possible afin de décrire un objet du sursol par plusieurs structures brillantes (cf. chapitre 3, III.2.2.2).

La position du point d'accès ou de la croix n'est pas très précise. Les disparités estimées peuvent donc être erronées. Il nous semble donc important lors de l'optimisation de tolérer une erreur sur les disparités. Pour cela, nous ajoutons deux paramètres à la liste des paramètres de forme à rechercher : les disparités en ligne et en colonne (di, dj) du point d'accès ou du centre de la croix sur l'image gauche. En relation avec l'hypothèse d'épaisseur de trait de 3 pixels lors de la détection, nous prenons comme variation potentielle des disparités, ± 3 pixels.

Pour l'algorithme génétique, les tailles de population doivent être augmentées en conséquence, soit de 14 individus. Dans le cas des 'L', la méthode d'optimisation séquentielle est simplement modifiée en attribuant aux paramètres di et dj le même rôle lors de la recherche stochastique que l'orientation, la position en ligne et la position en colonne du point de référence (cf. chapitre 3, figure 3-37).

En faisant évoluer une même forme sur les images gauche et droite géoréférencées, nous supposons que la disparité est constante le long de la forme. Dans l'image radar, les disparités varient à altitude constante (cf. chapitre 2, I.1.1.2.2). Quand est-il dans l'image géoréférencée à altitude nulle ?

III.3.2. Variation de la disparité à altitude constante dans l'image géoréférencée

Nous avons étudié la déformation due à la projection d'une droite avec une erreur d'altitude (chapitre 3, I.3). Dans le cas de visées de même côté, trajectoires parallèles et angles Doppler nuls, l'estimation de la variation de disparité à altitude constante en fonction de la position du point découle directement du calcul présenté au chapitre 3. On note (figure 4-6) :

- h_p , l'altitude du plan de projection,
- Y_1 (resp. Y_2) la coordonnée sur l'axe y_1 (resp. y_2) de P ,
- Y'_1 (resp. Y'_2) la coordonnée sur l'axe y_1 (resp. y_2) de P projeté sur le plan d'altitude h_p ,
- h l'altitude de P .

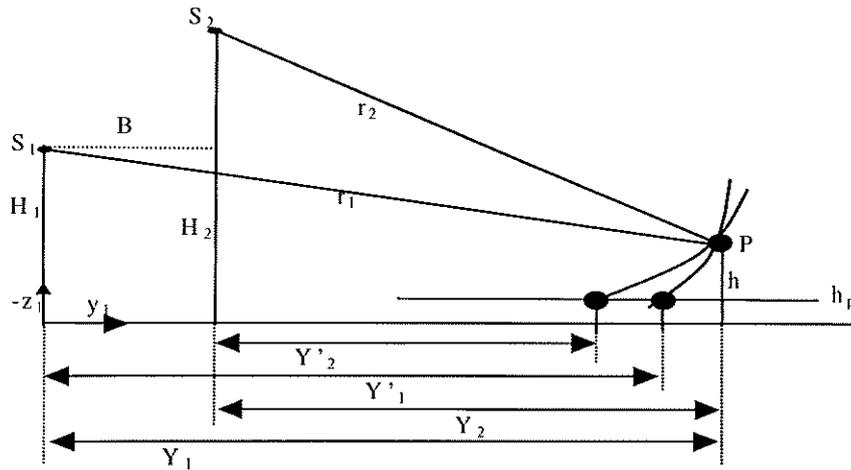


figure 4-6 : projection du point P à une altitude h_p différente de son altitude h

La disparité observée sur les images géoréférencées à l'altitude h_p vaut : $d = Y'_2 + B - Y'_1$. Cette disparité est nulle lorsque le point est projeté à la bonne altitude. Nous exprimons :

$$\frac{\partial d}{\partial Y_1} = \frac{\partial Y'_2}{\partial Y_1} - \frac{\partial Y'_1}{\partial Y_1} = \left(1 - 2 \frac{e_h(H_2 - h_p)}{Y_2^2} + \frac{e_h^2}{Y_2^2}\right)^{-1/2} - \left(1 - 2 \frac{e_h(H_1 - h_p)}{Y_1^2} + \frac{e_h^2}{Y_1^2}\right)^{-1/2} \text{ avec } e_h = h - h_p$$

En effectuant un développement limité à l'ordre 1 ($e_h \ll Y_2$ et $e_h \ll Y_1$), on a alors pour $h_p = 0$:

$$\frac{\partial d}{\partial Y_1} = e_h \left(\frac{H_2}{Y_2^2} - \frac{H_1}{Y_1^2} \right) = e_h \left(\frac{1}{H_2 \tan^2 \theta_2} - \frac{1}{H_1 \tan^2 \theta_1} \right)$$

Dans notre cas, nous avons conclu qu'en monoscopie, la conservation des linéarités et des courbures est vraie localement et peut être supposée plus largement en considérant une épaisseur de l'écho de quelques pixels (chapitre 3, I.3). De la même manière, la variation de la disparité peut être négligée pendant la reconnaissance de la forme en stéréoscopie. Cependant, dans notre contexte aérien, haute résolution et pour des hauteurs de structures industrielles, nous sommes à la limite de validité de cette hypothèse. Afin de réduire les erreurs de disparités liées à cet effet, les disparités le long des formes extraites seront affinées localement en chaque pixel avant calcul des altitudes.

Si le système est tel que l'effet de l'erreur de projection n'est plus négligeable, nous avons vu que l'extraction doit être faite sur l'image radar directement. Pour effectuer l'extraction sur les deux images simultanément, il sera nécessaire de travailler non pas à disparité constante mais à altitude constante. Le processus d'extraction devra donc être itératif et estimer simultanément l'altitude de la forme extraite.

III.4. Empreintes grossières sur les structures

Les empreintes grossières des objets détectés sont construites à l'aide d'un disque pour les demi-couronnes et d'un rectangle pour les segments issus d'une croix. Si la forme est au sol, cette empreinte n'englobe pas tous les échos issus du toit. Comme on ne connaît pas les altitudes du sol à ce stade de la chaîne radargrammétrique, il n'est pas possible de savoir si la forme est au sol ou élevée. Ainsi, on suppose que la forme est au sol et les empreintes sont dilatées afin d'englober les pixels d'un toit

potentiel de hauteur maximale, dh_{max} . Dans le cas de Doppler nuls, ceci équivaut à réaliser la translation de l’empreinte en avant de la forme le long de la direction de visée pendant une distance équivalente à la hauteur maximale (figure 4-7). Cette distance vaut en pixel : dh_{max} / TDS . Nous construisons ces empreintes sur les images géoréférencées puis les projetons sur les images rectifiées pour préparer le calcul du MNT.

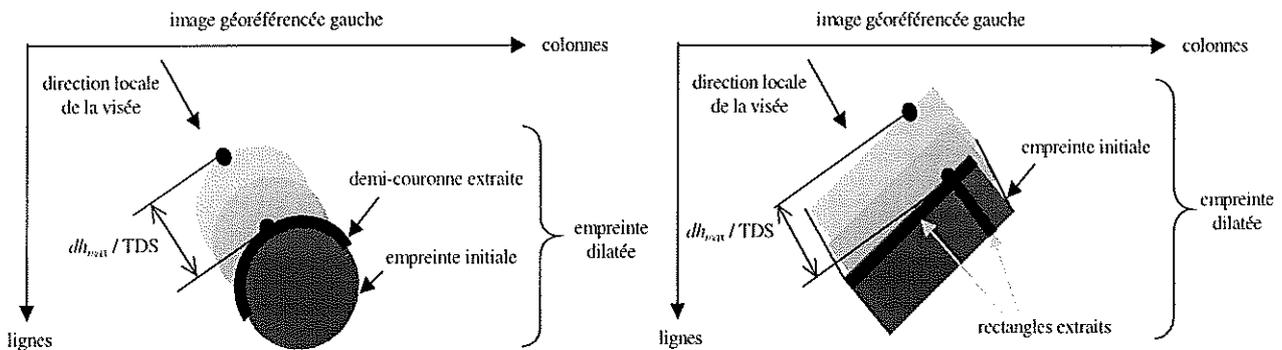


figure 4-7 : formation de l’empreinte et dilatation dans l’image géoréférencée pour une demi-couronne et des rectangles

IV. Calcul du 3-D

Le MNE est construit en deux étapes (figure 4-1) :

- le calcul des altitudes du sol entre les structures détectées fournissant le MNT,
- la mesure des hauteurs des structures détectées dans le cas où un écho du toit est détectable.

IV.1. Altitudes du sol entre les structures extraites

La carte des disparités sur les pixels susceptibles d’être situés au sol est obtenue par un algorithme de mise en correspondance dense. Le MNT est calculé par stéréoscopie puis interpolé. L’objectif visé est d’obtenir un MNT suffisamment précis pour décider si une forme extraite est au sol ou non.

IV.1.1. Disparités par algorithme de mise en correspondance pyramidal

Les disparités sont estimées à partir des images rectifiées dans la géométrie épipolaire. Le domaine se réduit donc théoriquement à un intervalle sur une ligne. Le coefficient de corrélation basée sur les différences sert de fonction de similarité. Nous avons indiqué dans le paragraphe IV.1.1.1 du chapitre 2 que les disparités ‘bavent’ autour des échos forts. Comme on ne sait pas si un écho fort est au sol ou sur un toit, ses points, indiqués par la classification, sont masqués lors de la mise en correspondance. Les autres pixels, même s’ils sont sur un toit, ne sont pas gênants pour le calcul de la carte des disparités car ils n’ont pas d’influence sur les pixels voisins comme pour les échos forts.

Un algorithme dense aller-retour et pyramidal à 3 niveaux sert à apparier les points non masqués. La pyramide est construite par filtrage multi-vue 2x2 des images. Le résultat à un niveau de la pyramide sert d'initialisation pour la mise en correspondance du niveau suivant. Le domaine de recherche est réduit d'un facteur 2 à chaque niveau. L'étude que nous avons menée sur la fiabilité des appariements est exploitée en utilisant un seuil sur les coefficients de corrélation équivalent à conserver 80% des meilleurs appariements et une fenêtre de corrélation 11x11 à chaque niveau. Enfin, nous utilisons un algorithme 'aller-retour' pour prendre en compte la contrainte d'unicité qui peut être raisonnablement utilisée sur nos données, du fait que le sol est assez plat et que les images sont acquises du même côté.

Les disparités des points appartenant aux empreintes grossières des objets extraits sont enfin masquées avant le calcul du MNT.

IV.1.2. Altitudes par calcul stéréoscopique et post-traitements

Les altitudes des points appariés sont estimées par calcul stéréoscopique à partir des disparités et des CPDV (cf. Chapitre 2, I.2.1.2). Le MNT obtenu présente des zones non renseignées à cause du masque sur les échos forts et sur les empreintes des structures, et des échecs d'appariement. Des altitudes aberrantes apparaissent en cas de mauvaise corrélation sur les surfaces homogènes. De plus, des zones d'altitudes élevées existent sur le bâti non détecté.

Deux post-traitements sont donc ajoutés pour réduire les altitudes aberrantes ponctuelles, limiter la présence des altitudes élevées correspondant aux toits des structures non détectées et interpoler le MNT. Les altitudes aberrantes sont tout d'abord supprimées. Pour cela, un modèle linéaire reliant l'altitude aux lignes et colonnes est estimé localement. Les altitudes, dont la distance au modèle est supérieure à un écart-type, sont supprimées. Ce procédé est réalisé sur une grande fenêtre d'analyse pour englober les amas d'altitudes correspondant au toit du bâti non détecté. Le MNT filtré est ensuite interpolé. Nous utilisons une interpolation linéaire après triangulation de Delaunay de la scène.

IV.2. Hauteurs des structures détectées et MNE

On observe que la plupart des formes extraites correspondent à l'écho double. Ces échos indiquent en stéréoscopie l'altitude du sol. Les hauteurs sont alors recherchées localement pour chaque structure détectée. Afin d'exploiter un maximum d'informations, plusieurs procédures, stéréoscopiques et monoscopiques, sont utilisées conjointement. Nous indiquons la méthode de fusion des informations et les trois procédures d'estimation des hauteurs retenues. Cette mesure est suivie par l'affinage des empreintes des structures et la construction du MNE.

IV.2.1. Méthode

Le MNT estimé est utilisé pour décider si un point est situé sur le sol ou non. Le seuil de décision, noté *erms*, dépend du pouvoir stéréoscopique du couple d'images qui a été évalué pour les images RAMSES dans le chapitre 2 (II.5 et ANNEXE C).

Chaque hauteur trouvée par l'une des procédures est comparée avec l'altitude locale du sol sur le MNT. Deux cas sont possibles : les points correspondants sont au sol ou élevés. Dans le cas de points

élevés, l'histogramme des hauteurs possibles est complété en considérant une gaussienne de moyenne, l'altitude trouvée, et d'écart-type, $erms$ dans le cas d'une mesure stéréoscopique et em dans le cas d'une mesure monoscopique. L'altitude de la structure est estimée par MV. Soit (h_i, σ_i) pour i entre 1 et M , les couples représentant les paramètres des lois gaussiennes pour les M mesures d'altitudes effectuées. Les mesures étant indépendantes, la loi pour l'altitude s'écrit :

$$p(h) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(h-h_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

La solution MV est donnée par :

$$h = \left(\sum_{i=1}^M \frac{h_i}{\sigma_i^2}\right) / \left(\sum_{i=1}^M \frac{1}{\sigma_i^2}\right)$$

Cette méthodologie est précisée par le schéma sur la figure 4-8. Nous décrivons ci-dessous les trois procédures retenues : deux stéréoscopiques (a et b) et la troisième monoscopique (c).

Le MNT et les structures 3-D constituent alors le MNE.

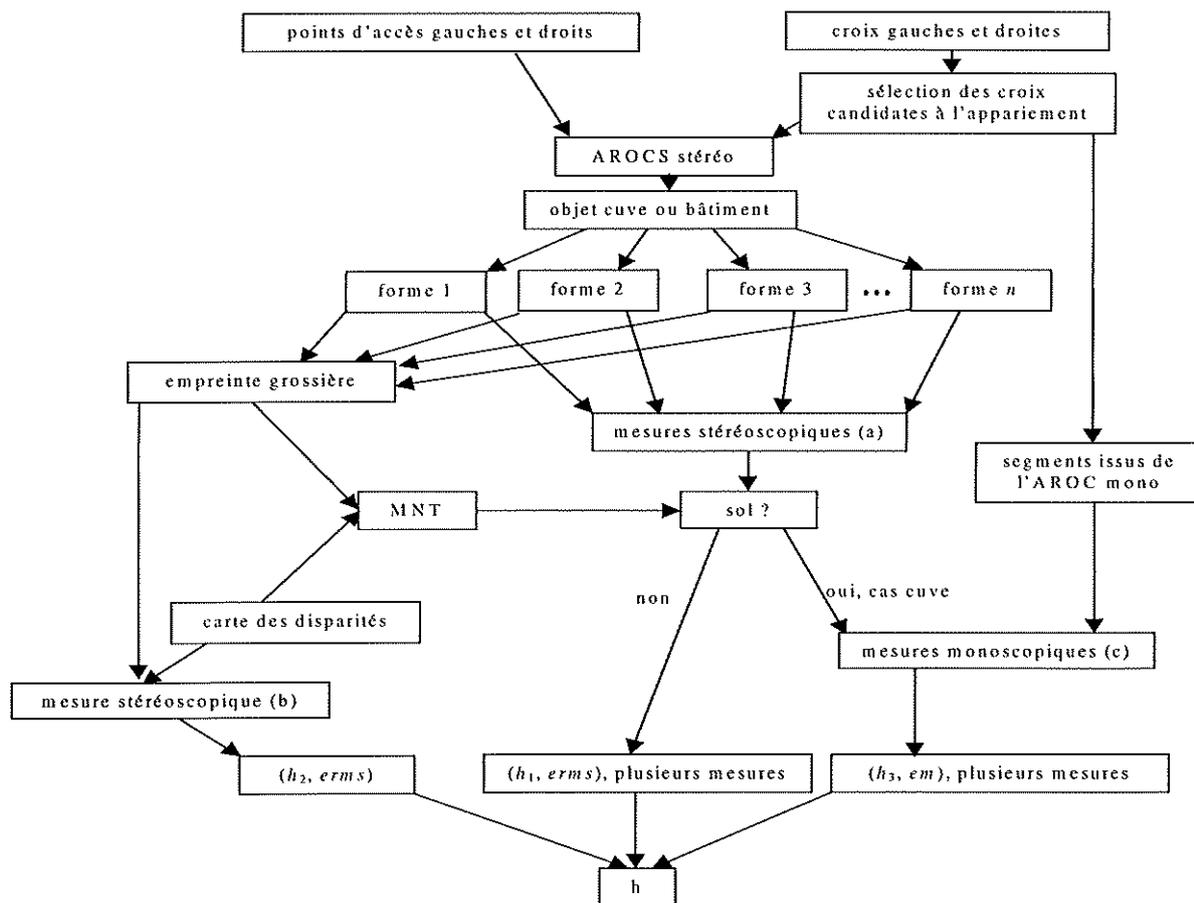


figure 4-8 : mesure de la hauteur d'un objet cuve ou bâtiment partant des n formes extraites (rectangles ou demi-couronnes associées au même objet du sursol) et éventuellement des segments issus de l'extraction monoscopique à partir des croix non candidates à l'appariement

IV.2.2. Mesures stéréoscopiques

Deux mesures stéréoscopiques sont effectuées lors de la chaîne de traitement. Elles sont utilisées pour estimer l'altitude de l'objet dans le cas où elles correspondent à une altitude supérieure à celle du sol, plus *erms*.

Procédure a : les disparités le long des formes projetées sur les images rectifiées sont calculées par l'algorithme de mise en correspondance pyramidal (IV.1.1). Cet appariement des points de la forme à gauche avec les points de la forme homologue à droite est nécessaire pour prendre en compte la variation de disparité le long de la forme (cf. III.3.2). Nous calculons l'altitude moyenne le long de la forme et l'écart-type des mesures d'altitudes. Si l'écart-type est supérieur au seuil de décision *erms*, l'altitude moyenne n'est pas considérée comme fiable. Ceci peut être dû à des erreurs de mise en correspondance. Dans ce cas, nous retenons seulement l'altitude indiquée par le centre de la demi-couronne pour les cuves et les altitudes aux points extrémités des segments pour les bâtiments. Après comparaison avec l'altitude locale du sol, la primitive est soit au sol, soit élevée. Si elle est au sol, elle sert de référence lors de la mesure monoscopique dans le cas des cuves. Sinon l'altitude participe à l'estimation MV de la hauteur de la structure.

Procédure b : l'altitude est issue de la carte des disparités dense précédemment calculée pour le MNT. Les disparités sur les pixels situés dans l'empreinte grossière de la structure et correspondantes à une hauteur supérieure à celle du sol sont utilisées pour calculer une altitude élevée moyenne. Cette altitude participe à l'estimation MV de celle de la structure.

IV.2.3. Mesure monoscopique

Procédure c : la hauteur est estimée par la mesure de la longueur du repliement sur l'image radar (cf. chapitre 2, I.2.1.1). L'altitude absolue est obtenue en ajoutant celle du sol, fournie par le MNT. Une méthode différente pour les cuves et pour les bâtiments est utilisée. En effet, l'écho du bord du toit pour les bâtiments semble plus difficile à repérer que celui des cuves. La longueur du repliement ne peut dans ce cas pas être estimée de la même façon.

Pour les cuves, le modèle simplifié utilisé sur les images en bande S est constitué de deux spots et de la demi-couronne brillante (cf. chapitre 3, I.1). A partir d'une demi-couronne extraite et située à l'altitude du sol, un accumulateur 1-D sur les amplitudes le long de l'axe des distances permet de détecter les spots brillants de part et d'autre de l'écho double et à rayon fixé (figure 4-9). Le maximum de cet accumulateur indique la position des spots et donc la longueur du repliement. La hauteur correspondante est calculée d'après l'angle d'incidence local et l'équation 2-4.

Cette mesure peut être réalisée sur les deux images séparément ou simultanément. Nous choisissons d'effectuer une mesure monoscopique guidée par l'image de plus faible angle d'incidence qui permet d'aboutir à la meilleure précision possible (cf. chapitre 2, II.4.2). En l'absence d'information sur l'image de plus faible angle d'incidence, il demeure cependant utile d'exploiter la seconde. Comme pour l'AROCS stéréoscopique, l'accumulation est donc effectuée simultanément sur les deux images.

Pour les bâtiments, l'écho du bord du toit est difficilement repérable (cf. chapitre 1, II.1). Nous espérons davantage trouver l'altitude des bâtiments par le calcul de disparités. Néanmoins, il est possible de réaliser une mesure monoscopique lorsqu'une croix entre l'écho double et l'écho du bord du toit a été détectée (figure 4-9). Pour cela, la longueur et l'orientation du segment extrait par

l'AROCs monoscopique pour une croix non candidate à l'appariement, donnent une mesure de la longueur l du repliement. Cette longueur permet comme dans le cas précédent de calculer la hauteur connaissant l'angle d'incidence local. Cette mesure est effectuée sur chaque croix de ce type.

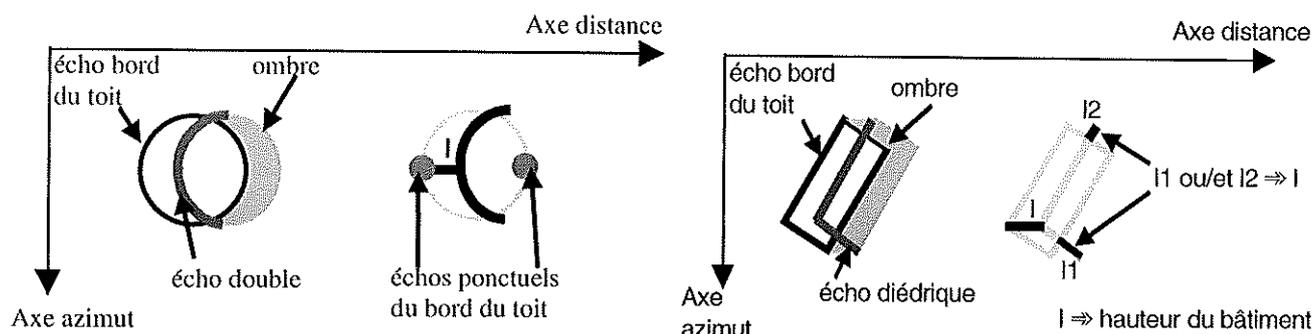


figure 4-9 : mesure monoscopique de la hauteur pour les cuves et pour les bâtiments

V. Résultats

Nous proposons d'appliquer cette chaîne de traitements sur deux scènes dont les données stéréoscopiques avec un angle stéréoscopique d'au moins 10° :

- la scène des cuves de la zone A (figure 1-20),
- la scène des bâtiments de la zone C (figure 1-22).

Nous analysons les résultats obtenus aux étapes suivantes :

- sélection des croix candidates à l'appariement,
- mise en correspondance des primitives d'initialisation candidates,
- extraction stéréoscopique des demi-couronnes ou affinage stéréoscopique des rectangles,
- formation des empreintes grossières sur les structures extraites,
- calcul du MNT dense,
- mesure des hauteurs.

La précision des résultats 3-D est calculée par comparaison avec les réalités terrain (ANNEXE C) et la potentialité théorique des couples, exprimée en **ps** (dernier tableau, ANNEXE E).

V.1. MNE sur la scène des cuves

Nous utilisons dans cette section les vues 1 et 2 de la zone A (figure 1-20) représentant des cuves simples en bande S. L'angle stéréoscopique est de 10° .

V.1.1. Extraction stéréoscopique

La mise en correspondance des primitives d'initialisation est relativement performante du fait que les points d'accès sont peu nombreux comparativement au nombre total de pixels sur les images.

Ainsi, sur les 132 points d'accès à gauche et 178 à droite, le pourcentage de faux appariements est de seulement 3% sur 106 associations.

Pour l'extraction stéréoscopique des demi-couronnes, nous utilisons l'AROCS-AG2 étendu avec le critère fondé sur les fonctions d'appartenance. Nous obtenons un résultat de qualité légèrement meilleure qu'en monoscopie (figure 4-10). Ainsi la probabilité de détection est de 79% contre en 78 et 73% monoscopie (cf. chapitre 3, tableau 3-6). Le taux de fausses alarmes vaut 13% contre 14 et 16% précédemment.

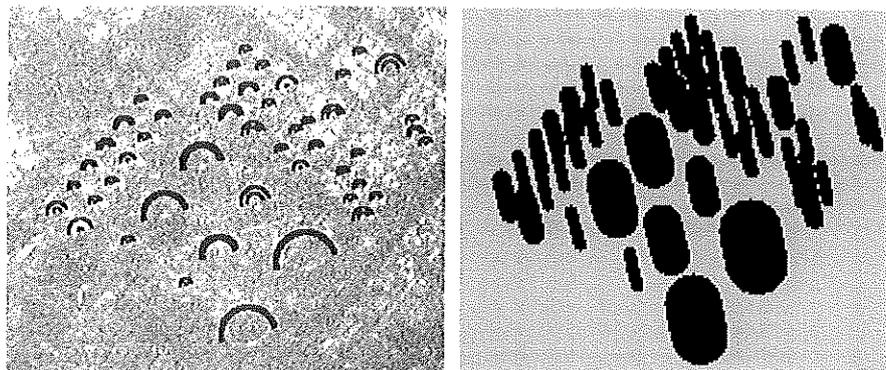


figure 4-10 : extraction stéréoscopique des demi-couronnes par AROCS-AG2 avec le critère fondé sur les fonctions d'appartenance et empreintes grossières dans la géométrie de l'image gauche

V.1.2. MNT

Etant donné que le sol ne présente pas de discontinuités de relief sur les scènes traitées, la précision de localisation est moins importante que la précision altimétrique. Ainsi, par filtrage multi-vue des images, le MNT à un niveau sous-résolu de la pyramide peut avoir une précision altimétrique plus fine qu'à la pleine résolution. Nous obtenons que les MNT issus du niveau 1 (multi-vue 2x2) de la pyramide sont de meilleure qualité en RMS mais au prix d'une perte de précision en moyenne par rapport à celui issu de la pleine résolution (tableau 4-1). On observe que les post-traitements ont permis de réduire efficacement l'erreur altimétrique RMS sans détériorer fortement l'erreur moyenne.

couple	niveau	MNT initial		après suppression des valeurs aberrantes		MNT interpolé	
		μ	σ^1	μ	σ^1	μ	σ^1
vue 1 - vue 2	0	1.6	6.5	1.5	3.4	1.7	3.9
zone A (10°)	1	2.0	4.9	2.5	2.8	2.6	2.8

tableau 4-1 : comparaison des précisions altimétriques pour les MNT obtenus à partir des niveaux 1 et 0 de la pyramide. Erreurs exprimées en pixels sol ps

Par ailleurs, quelques tests ont été réalisés pour étudier l'apport d'un filtrage du bruit (cf. chapitre 2, I.2.2.3). L'utilisation des filtres médian, Frost et GammaMAP n'a cependant pas permis d'aboutir à des conclusions précises.

Sur la figure 4-11, on visualise la carte des disparités avant superposition des empreintes des objets détectés et le MNT, résultant du niveau 1 de la pyramide. On constate que les toits des structures

¹ Mesure de l'erreur RMS par rapport à la réalité terrain moins 10% des valeurs aberrantes

n'apparaissent pas sur la carte des disparités. Après post-traitements, l'erreur altimétrique RMS du MNT est de 2.8 ps pour une potentialité théorique de 1.6 ps. L'erreur moyenne sur les disparités est donc d'environ 1.8 pixels sol, ce qui est satisfaisant mais pourra sans doute être amélioré puisqu'en automatique les erreurs d'appariements sont entre 1 et 2 pixels d'après [LEBERL94].

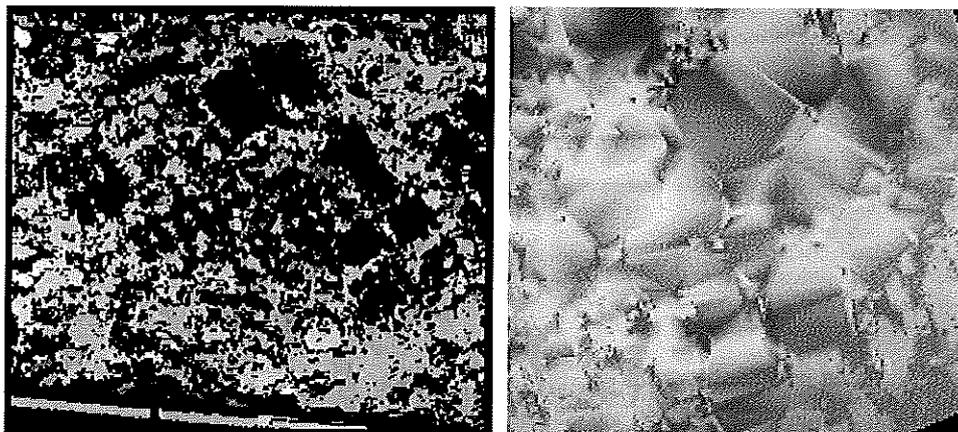


figure 4-11 : carte des disparités sur les points non échos forts et MNT après superposition des empreintes des objets extraits, suppression des altitudes aberrantes et interpolation

V.1.3. MNE

Le calcul stéréoscopique sur chaque objet extrait aboutit à leur localisation planimétrique. On observe sur le résultat de la figure 4-12 que les petites cuves ne sont pas toujours précisément localisées. L'épaisseur des échos forts peut expliquer ces imprécisions. La scène est cependant assez bien interprétée. Comme les toits ne sont pas texturés et les objets parfois petits, la carte des disparités (figure 4-11) fournit peu d'information sur les altitudes des cuves (moins de 50% des cas). Les hauteurs sont donc obtenues essentiellement grâce à la mesure monoscopique du repliement (dans 90% des cas). Lors de cette étape, nous avons pu remarquer visuellement que les spots sur le bord du toit ne sont pas bien détectés si l'écho est trop faible ou s'il y a ambiguïté avec d'autres échos forts. Les limitations sont donc les mêmes que lors de l'extraction des demi-couronnes. Nous obtenons que pour 63% des objets extraits, la détection de l'écho du bord du toit semble juste.

L'erreur RMS¹ pour le sursol détecté (en relatif par rapport au sol) est de 1.6 ps. Cette mesure doit être comparée avec le potentiel théorique de la mesure monoscopique qui est de 0.6 ps. Si l'on considère l'écart des hauteurs pour chaque objet détecté (graphique sur la figure 4-12), les erreurs varient entre 0 et 6 ps avec deux valeurs aberrantes. Nous obtenons une erreur altimétrique RMS¹ de 2.4 ps. Ceci correspond à une erreur de mesure de la longueur du repliement d'environ 4 pixels par rapport au potentiel théorique. Cette erreur est probablement due à l'épaisseur des échos forts. Les erreurs les plus importantes ont lieu lorsque l'écho du bord du toit est trop faible (cas de la cuve 8) ou lorsque la proximité des objets induit des recouvrements des échos forts issus de différentes structures (cas de la cuve 19).

La vue 3-D (figure 4-13) montre finalement la performance de la méthode sur les cuves, au niveau de l'interprétation de la scène et de la cohérence des hauteurs trouvées d'une cuve à l'autre.

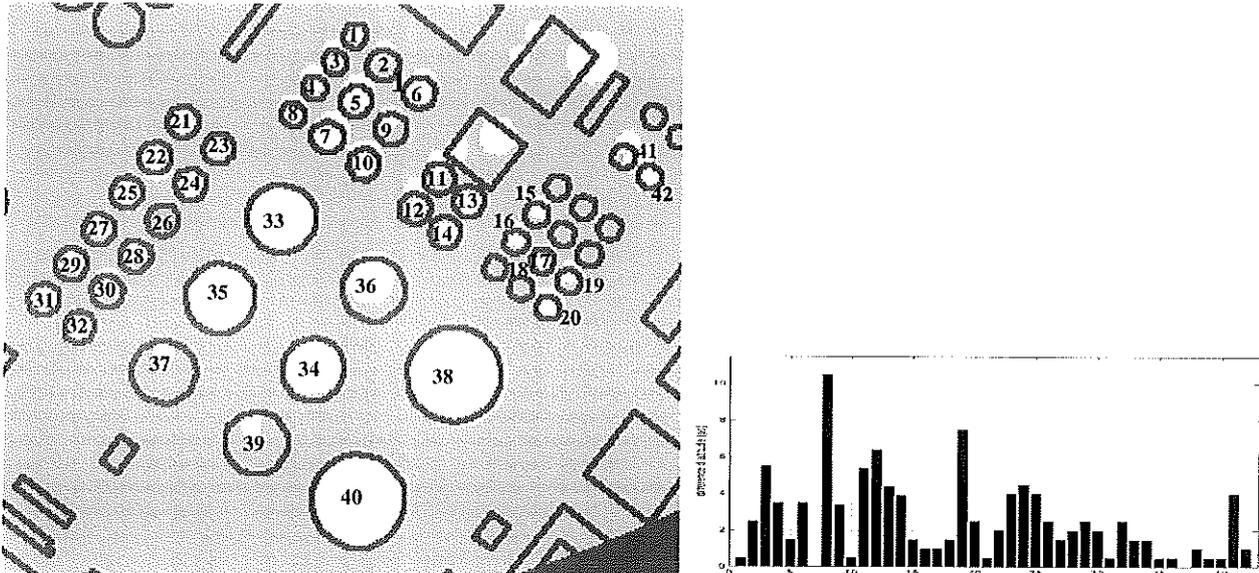


figure 4-12 : MNE : superposition de la réalité terrain en noir et écart de hauteur par rapport à la vérité terrain par objet détecté

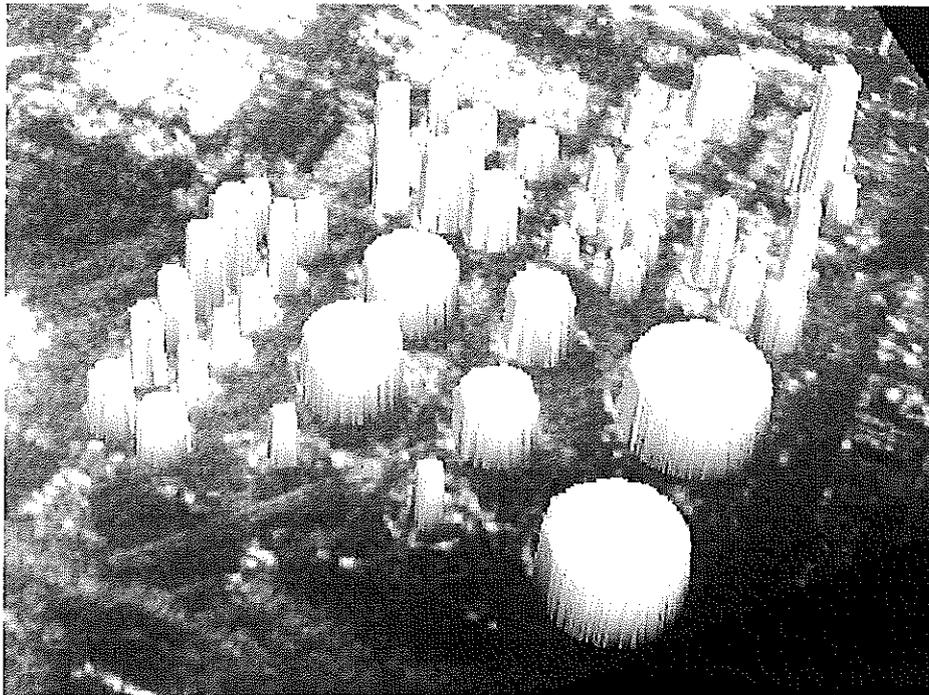


figure 4-13 : MNE : vue 3-D avec le sol modélisé par un plan à altitude moyenne

V.2. MNE sur la scène des bâtiments

Nous exposons les résultats obtenus avec les couples de la zone C (figure 1-22) représentant des bâtiments industriels :

- couple 1 : vue 4 – vue 5 d'angle stéréoscopique de 10° en bande X,
- couple 2 : vue 1 – vue 2 d'angle stéréoscopique de 10° en bande S,
- couple 3 : vue 1 – vue 3 d'angle stéréoscopique de 30° en bande S.

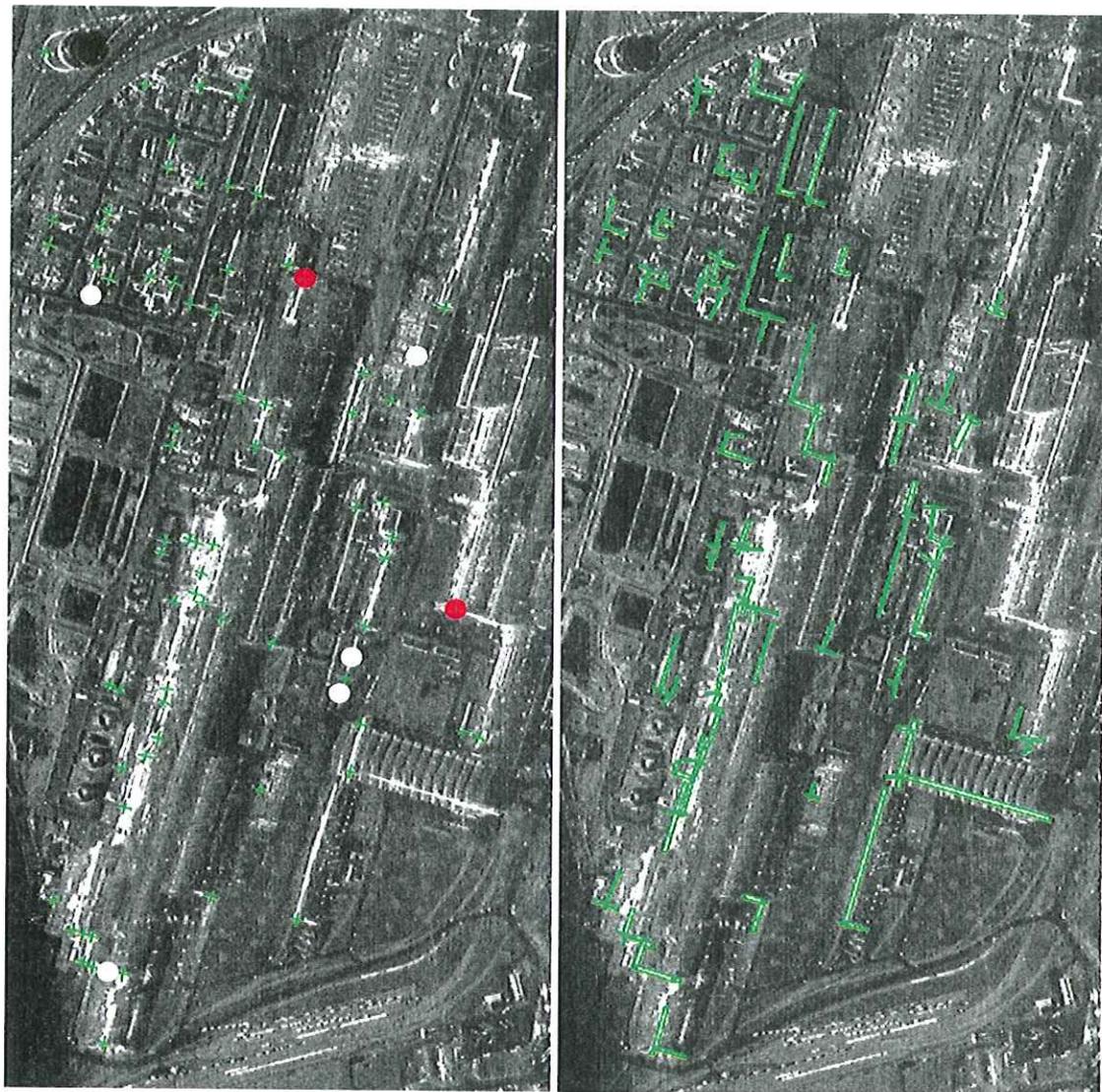
V.2.1. Extraction stéréoscopique

L'étape de décision a permis d'identifier quelques croix non valides à gauche et à droite (croix remplacées par un disque blanc sur les figures 4-14, 4-15 et 4-16 (a)). Visuellement, il est difficile sur ces images de répertorier les croix valides et non valides. Nous pouvons seulement noter que les croix identifiées semblent effectivement entre segments d'altitudes différentes. Trois bâtiments, d'altitude faible, sont cependant perdus lors de cette décision (bâtiments de taille moyenne en bas à gauche et en bas au centre et petit bâtiment en haut à gauche).

A l'issue de cette étape, les taux de faux appariements pour les trois couples sont situés autour de 3-4% sur une soixantaine de croix appariées. Lors de cet appariement, nous perdons pour chaque couple entre 3 et 6 amorces sur les principaux bâtiments, la croix n'ayant pas été détectée sur l'une des deux images (croix représentées par un disque rouge sur les figures 4-14, 4-15 et 4-16 (a)).

L'extraction stéréoscopique, comme pour les cuves, est soumise aux mêmes limitations qu'en monoscopie (figures 4-14, 4-15 et 4-16 (b)). Les petits bâtiments ne sont pas détectés ou de manière imprécise. Les pourcentages de détection obtenus sont comparables pour les trois couples : de l'ordre de 80% pour les bâtiments formant un 'L', de taille moyenne ou grande. Les longueurs et la localisation des rectangles, estimées par l'AROCS-OS, semblent précises lorsque l'image de la structure correspond au modèle utilisé, c'est-à-dire un écho double fort et un fond plus foncé et homogène. Ainsi, les grands bâtiments de forme complexe (numérotés de 1 à 3 sur la figure 3, ANNEXE C) ne sont pas bien délimités pour les trois couples.

Les empreintes grossières (figure 4-17) montrent enfin que l'interprétation de la scène est assez bonne. Des erreurs surviennent autour des petits bâtiments qui ne sont pas détectés ou agglomérés, et les empreintes sont incomplètes sur les grands bâtiments complexes du fait de la vue sous un seul côté et de l'utilisation d'un modèle de bâtiment rectangulaire.



(a)

(b)

figure 4-14 : Résultat de l'extraction sur le couple 1. (a) croix sur l'image droite avec les croix rejetées représentées par un disque blanc et les croix détectées sur une seule vue par un disque rouge.
(b) extraction stéréoscopique par AROCS-OS avec le critère binaire.

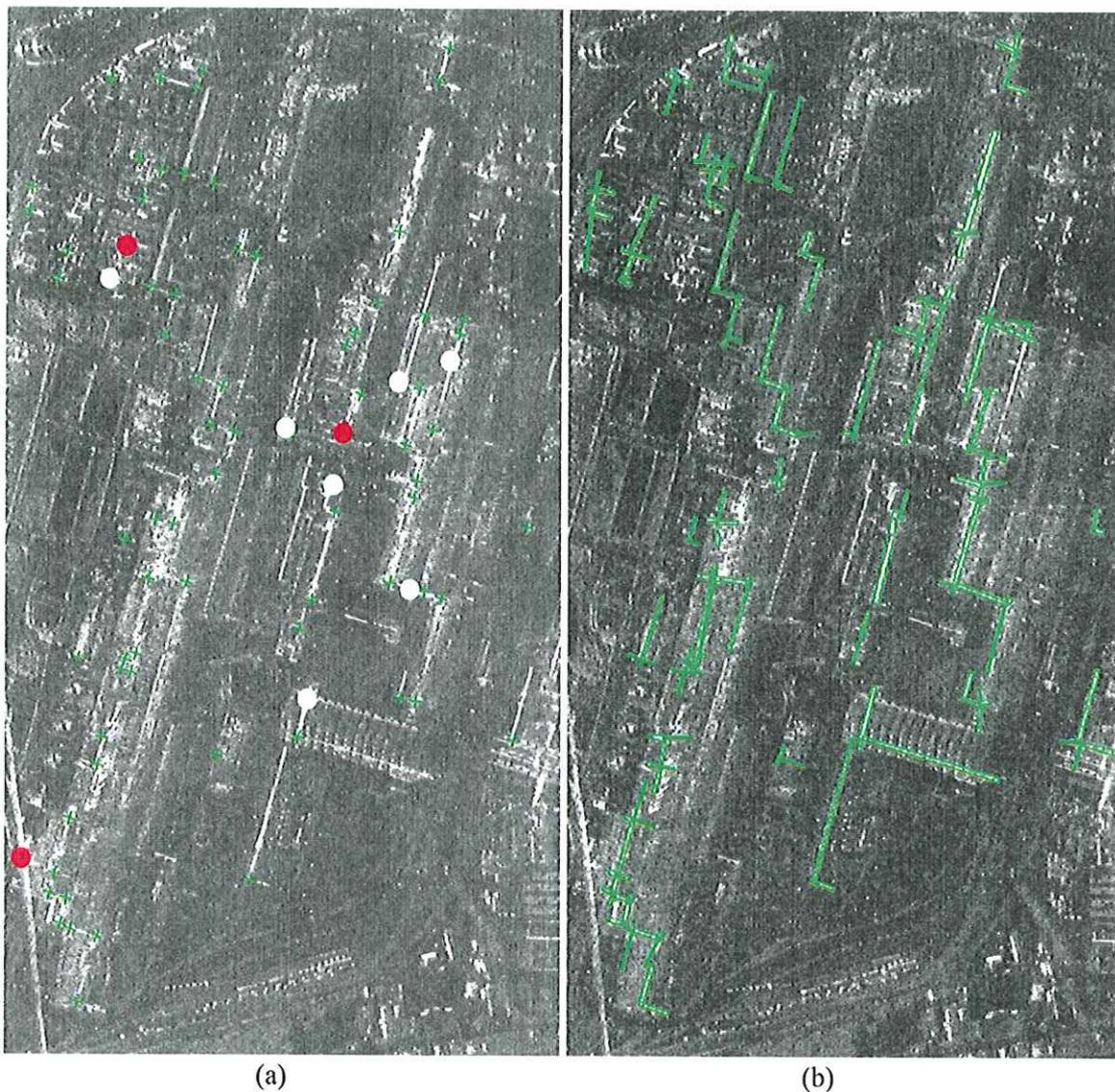


figure 4-15 : Résultat de l'extraction sur le couple 2. (a) croix sur l'image droite avec les croix rejetées représentées par un disque blanc et les croix détectées sur une seule vue par un disque rouge.
(b) extraction stéréoscopique par AROCS-OS avec le critère binaire.

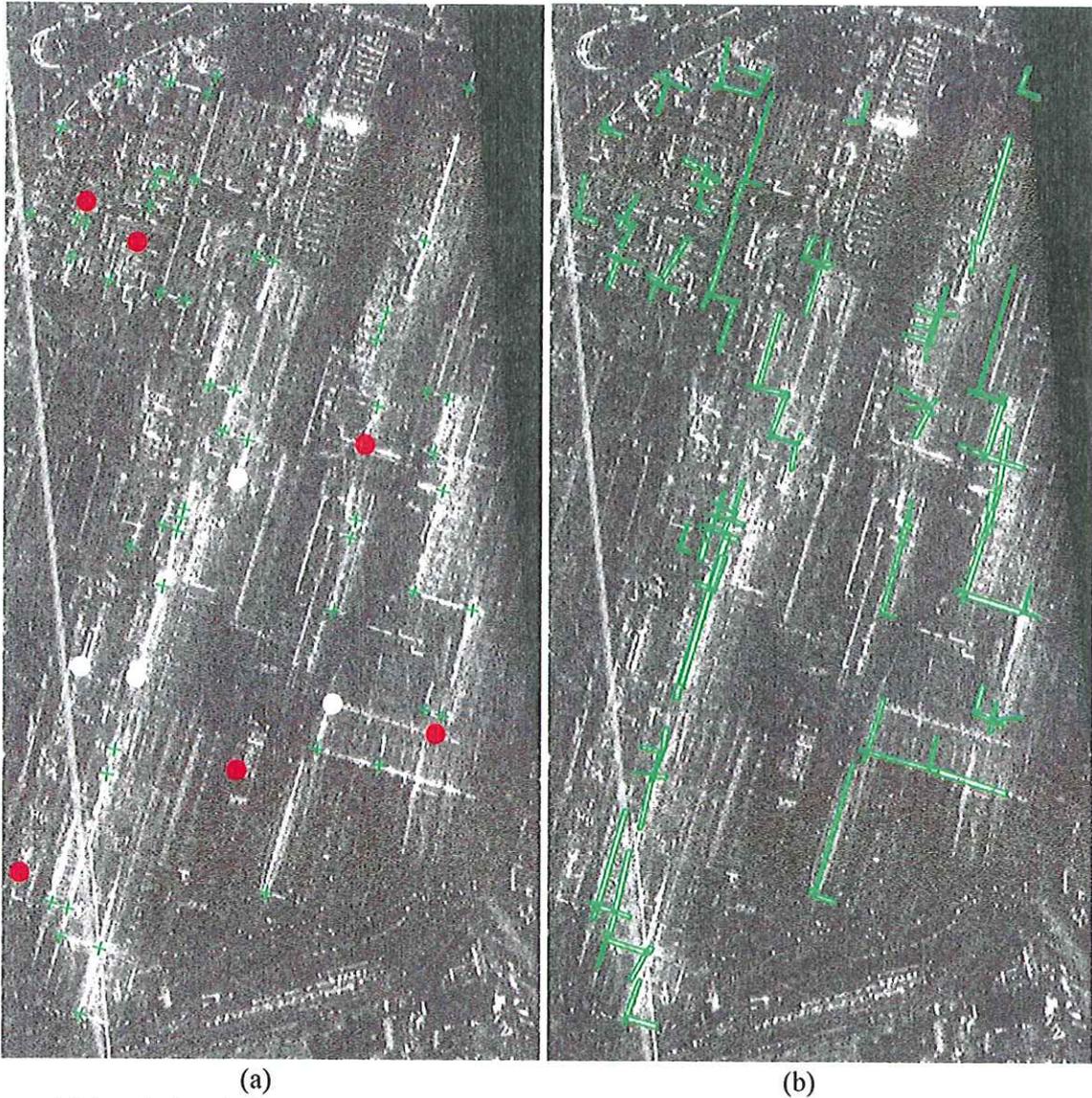


figure 4-16 : Résultat de l'extraction sur le couple 3. (a) croix sur l'image droite avec les croix rejetées représentées par un disque blanc et les croix détectées sur une seule vue par un disque rouge. (b) extraction stéréoscopique par AROCS-OS avec le critère binaire.

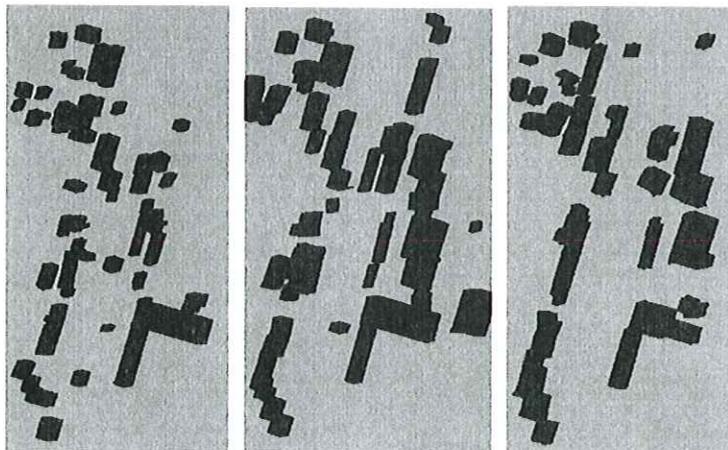


figure 4-17 : empreintes résultant de l'extraction stéréoscopiques pour les trois couples

V.2.2. MNT

La figure 4-18 montre l'exemple de la carte des disparités et du MNT obtenus à partir du couple 1. Nous observons que les MNT pour les trois couples sont plus précis en écart-type lorsqu'ils sont construits à partir du niveau 1 de la pyramide au lieu de l'image pleine résolution (tableau 4-2). L'erreur moyenne est cependant plus importante, en particulier pour le couple 1. Ainsi, les précisions altimétriques RMS^2 pour le niveau 1, correspondent respectivement à des erreurs moyennes de mise en correspondance de 1.5, 1.7 et 2.7 pixels par rapport au potentiel théorique des couples (dernier tableau de l'ANNEXE E). Ceci signifie qu'en pratique, la précision n'augmente pas linéairement avec l'angle stéréoscopique. A 10° d'écart angulaire, on retrouve un rapport similaire à celui obtenu sur la scène de cuves, qui était de 1.8 pixels. Les dissimilarités radiométriques entre les deux vues, plus importantes à 30° d'angle stéréoscopique qu'à 10° , expliquent sans doute cette différence. De plus, les altitudes des toits des grands bâtiments partiellement extraits ne sont pas toutes supprimées avant le calcul du MNT. On remarque que la précision moyenne du MNT de 0.5 ps à 30° ou 1.5 ps à 10° est très bonne.

couple	niveau	MNT initial		après suppression des valeurs aberrantes		MNT interpolé	
		μ	σ^2	μ	σ^2	μ	σ^2
couple 1 (X, 10°)	0	1.4	5.2	1.4	3.3	0.9	3.5
	1	3.6	4.3	2.7	3.1	3.9	3.2
couple 2 (S, 10°)	0	1.6	5.5	1.1	2.7	1.6	3.5
	1	1.4	4.1	1.0	2.1	1.5	2.9
couple 3 (S, 30°)	0	0.2	3.8	0.5	2.0	0.1	2.4
	1	0.7	3.0	0.8	1.7	0.5	1.9

tableau 4-2 : comparaison des précisions altimétriques pour les MNT obtenus à partir des niveaux 1 et 0 de la pyramide. Erreurs exprimées en pixels sol ps

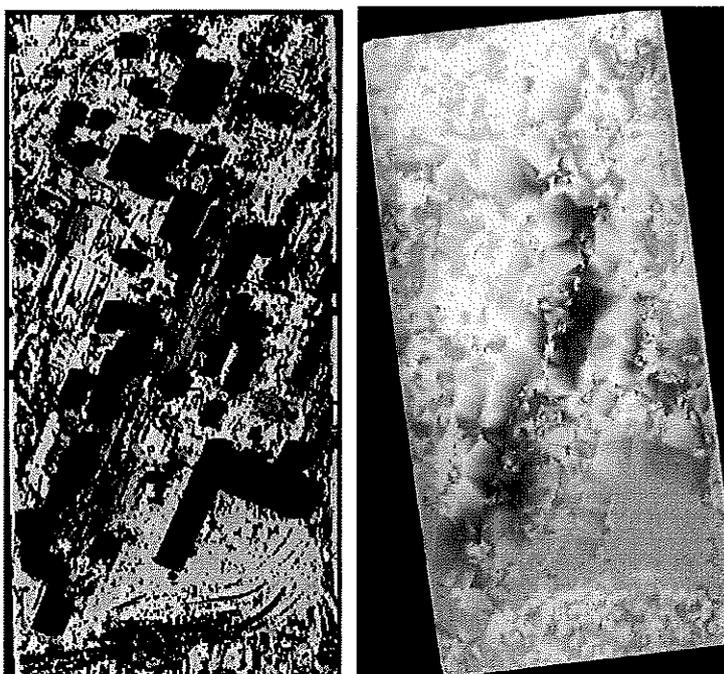


figure 4-18 : carte des disparités sur les points non échos forts et MNT après superposition des empreintes des objets extraits, suppression des altitudes aberrantes et interpolation, pour le couple 1

² Mesure de l'erreur RMS par rapport à la réalité terrain moins 10% des valeurs aberrantes

V.2.3. MNE

Sur la figure 4-19, la localisation planimétrique des bâtiments détectés semble précise malgré un décalage apparent pour le couple 1 (figure 4-19, (a)). Outre les non-détection, la scène est relativement bien interprétée et la majorité des côtés faisant face au radar sont restitués pour les bâtiments de taille moyenne ou grande sur les trois couples.

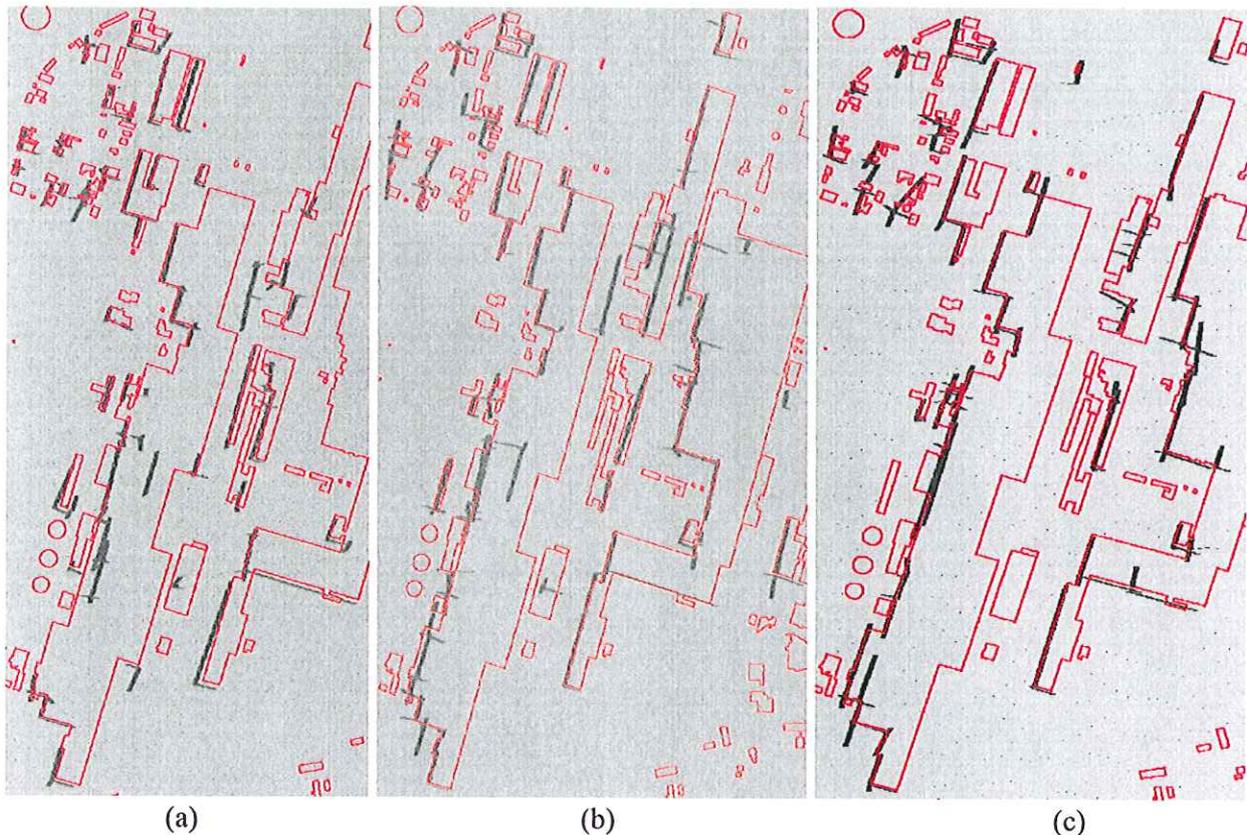


figure 4-19 : contours des objets détectés projetés sur le terrain en noir avec superposition de la réalité terrain en rouge pour les couples 1 (a), 2 (b) et 3 (c)

Pour la visualisation 3-D, des empreintes sont formées à partir de ces contours projetés. Seuls les coins de direction compatible avec la direction de visée sont conservés. Il en résulte des parties manquantes pouvant être importantes. Les empreintes sont donc parfois incomplètes du fait de la forme complexe des bâtiments et de la vue sous un seul côté (figures 4-20 et 4-21). C'est le cas des trois grands bâtiments déjà mentionnés (numérotés 1,2 et 3 sur la vérité terrain, ANNEXE C), même si l'ensemble du côté visible par l'antenne a bien été trouvé, par exemple pour le bâtiment 1 avec le couple 3 (figure 4-19, (c)). Les erreurs d'empreintes pourront donc être corrigées par des post-traitements étudiant la connexion des segments extraits et une information sur l'autre côté du bâtiment comme une troisième vue acquise depuis la visée opposée ou, si possible, les ombres. Un exemple de vue 3-D issue du couple 2 est présentée sur la figure 4-22.

L'évaluation des MNE en altimétrie est assez complexe. En effet, la vérité terrain montre une variation des hauteurs sur les toits pouvant être importante. De plus, les empreintes des objets détectés sont parfois incomplètes. Nous proposons de comparer pour chaque parallélépipède extrait, l'altitude trouvée avec l'altitude moyenne calculée pour une surface similaire dans la vérité terrain. L'écart maximal entre cette moyenne et les altitudes du toit représentées dans la vérité terrain est également indiqué. Cette dernière mesure nous permet de contrôler la pertinence de la comparaison entre altitude

trouvée et la vérité terrain. De plus, certains bâtiments sont numérotés même si aucune empreinte n'a pu être construite, par exemple dans le cas d'un coin non compatible avec la visée. Par ailleurs, les polygones correspondants au bâtiment 1 ont été regroupés en un seul bloc pour les mesures de précision, de même pour ceux du bâtiment 2.

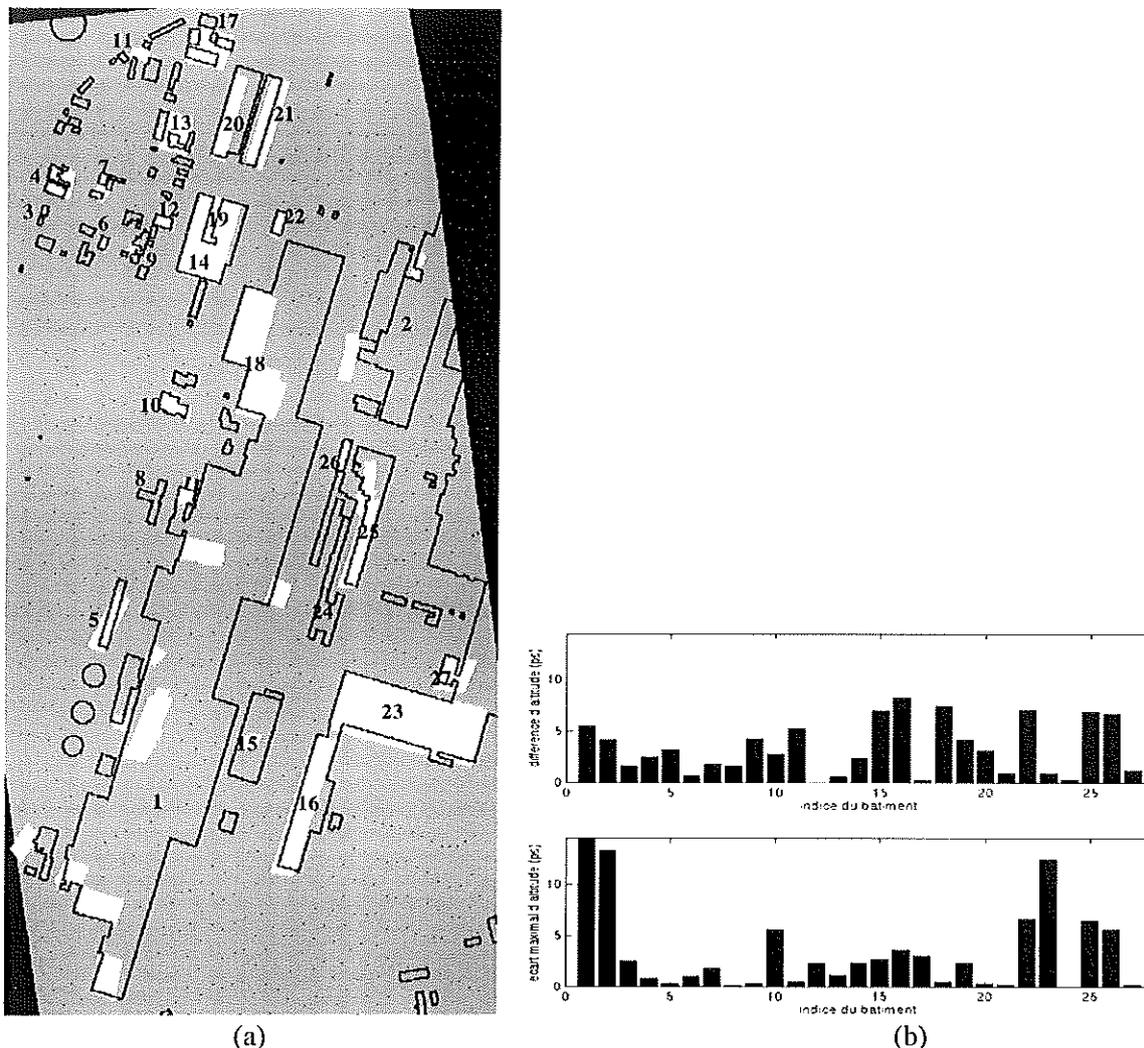


figure 4-20 : MNE pour le couple 1. (a) superposition de la réalité terrain en noir. (b) écart de hauteur par rapport à la vérité terrain par objet détecté et écart maximal de hauteur à la moyenne sur le toit sur la vérité terrain

D'après les figures 4-20 et 4-21, la corrélation entre variation de l'altitude sur le toit et erreur altimétrique n'est pas identifiable. Nous trouvons une erreur altimétrique RMS^2 de 3.9 ps pour le couple 1, 3.0 ps pour le couple 2 et 4.1 ps pour le couple 3. La mesure monoscopique est rarement effectuée lors de ce traitement car peu d'échos sur un bord de toits semblent avoir été détectés (moins de 5% des cas). Ces résultats doivent donc être comparés avec le potentiel stéréoscopique des couples (cf. dernier tableau de l'ANNEXE C). Les précisions obtenues correspondent à des erreurs moyennes de disparités de 1.8 pixels pour les deux premiers couples et 5.5 pixels pour le couple 3. Nous obtenons donc une erreur moyenne sur les disparités comparable au cas du MNT pour les deux couples d'angle stéréoscopique 10° et une erreur beaucoup plus grande sur le troisième couple. Ceci montre deux points :

- l'information 3-D sur les toits peut être obtenue par mesure stéréoscopique,
- à 30° d'écart angulaire, la mise en correspondance est fortement altérée à cause des dissimilarités radiométriques entre les deux vues.

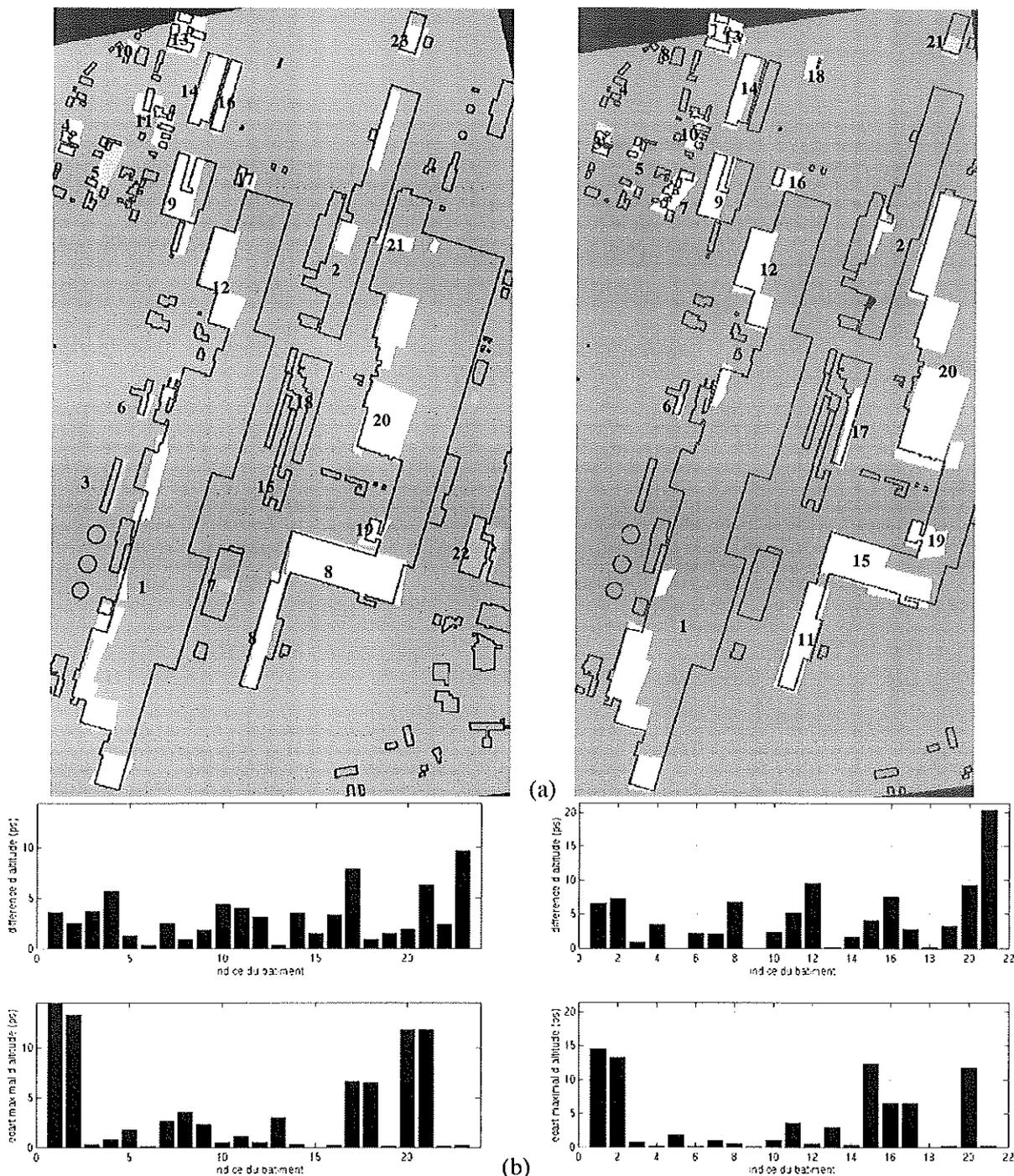


figure 4-21 : MNE pour les couples 2 et 3. (a) superposition de la réalité terrain en noir. (b) écart de hauteur par rapport à la vérité terrain par objet détecté et écart maximal de hauteur à la moyenne sur le toit sur la vérité terrain

Nous avons également mesuré l'erreur altimétrique RMS² entre les coins des polygones formés et le coin le plus proche sur la vérité terrain. Nous obtenons des précisions respectives de 2.4 ps, 3.0 ps et 2.3 ps, soit 1, 1.7 et 3.2 pixels d'erreur sur les mesures de disparités. Ceci confirme que l'utilisation d'images stéréoscopiques à fort écart angulaire n'améliore pas la précision du MNE. De plus, en

s'affranchissant des problèmes de variation éventuelle des altitudes sur les toits, ces mesures montrent la pertinence de la méthode. Pour améliorer la qualité altimétrique du MNE, il sera nécessaire de donner une modélisation plus précise des toits pentus et à plusieurs pentes. Ceci est envisageable dans le cas où le toit est représenté par une proportion suffisante d'échos significatifs.

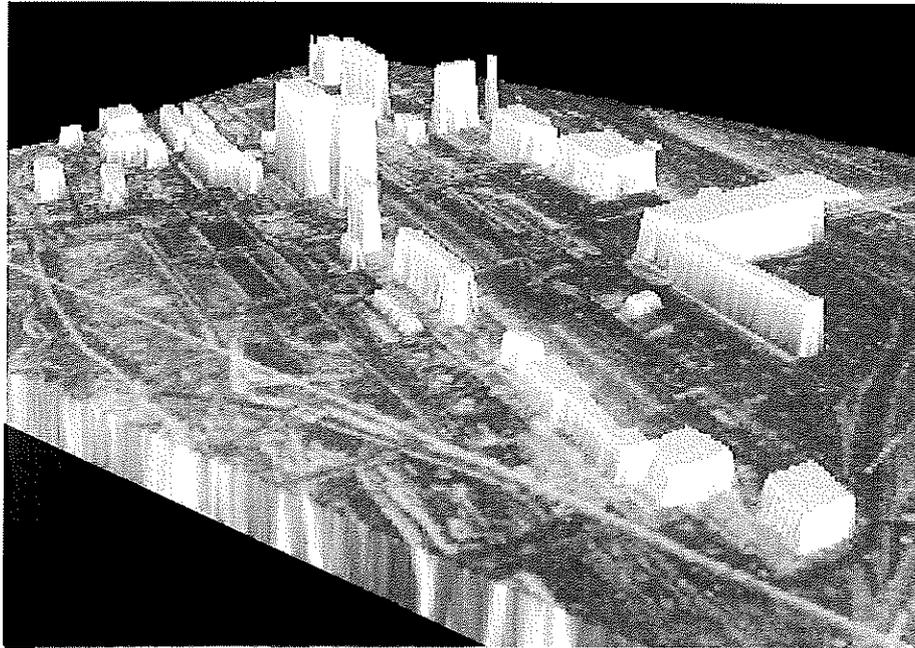


figure 4-22 : MNE pour le couple 2 : vue 3-D avec le sol modélisé par un plan à altitude moyenne

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la mise en œuvre d'une chaîne de traitements conduisant au MNE. L'approche comporte deux étapes principales : l'extraction planimétrique des structures puis altimétrique. Le point critique dans cette chaîne est l'extraction des structures qui a fait l'objet du chapitre 3. Lors de la première étape, certaines croix sont situées entre l'écho double et un écho du bord du toit et ne correspondent pas à un point réel sur le terrain. Nous avons donc présenté une solution permettant d'identifier ces croix afin de ne pas les appairer en stéréoscopie. L'appariement des primitives d'initialisation sélectionnées est ensuite réalisé par programmation dynamique. A partir de chaque primitive appariée, l'extraction stéréoscopique des structures consiste à trouver la forme par AROCS simultanément sur les deux vues. Nous avons montré que cette extraction peut dans notre cas être effectuée sur les images géoréférencées à disparité constante. Des empreintes grossières sur les objets détectés sont alors construites et le MNT est calculé par mise en correspondance dense des images privées des échos forts et après la suppression des empreintes, des valeurs aberrantes et une interpolation. Nous avons ensuite exposé une méthode pour estimer la hauteur des objets, combinant des mesures stéréoscopiques et une mesure monoscopique.

Sur cas réel et concernant le tri et l'appariement des primitives d'initialisation, la sélection des croix candidates à l'appariement aboutit à une décision comportant peu d'erreurs mais laisse des fausses alarmes. L'évaluation qualitative de ce traitement est cependant difficile car il n'est pas aisé de reconnaître visuellement ces croix du fait de la complexité de l'image radar. L'appariement des primitives d'initialisation s'avère robuste et conduit à un pourcentage d'erreurs d'appariements très

faible. En revanche, les structures détectées sur une seule image sont perdues lors de ce traitement. Ce cas survient pour quelques bâtiments de taille moyenne ou grande.

Les résultats sur l'extraction stéréoscopique montrent que les limitations sont les mêmes qu'en monoscopie, c'est-à-dire la sensibilité à la densité des échos forts dans la boîte englobante ou pour un écho trop faible. L'estimation des longueurs sur les grands bâtiments de forme complexe n'est pas améliorée par rapport à la monoscopie. La méthode permet néanmoins d'extraire la majorité des côtés visibles par le radar pour les bâtiments de taille moyenne ou grande. Pour obtenir des empreintes complètes sur les bâtiments, il serait nécessaire d'avoir une information supplémentaire : une troisième vue acquise depuis le côté opposé ou les ombres. Sur la scène des cuves, les performances sont légèrement meilleures en terme de taux de fausses alarmes et de probabilité de détection par rapport à l'extraction monoscopique. Les demi-couronnes permettent alors de définir précisément les empreintes des objets détectés.

La technique proposée pour construire le MNT permet d'obtenir une erreur altimétrique entre 1 et 3 fois le potentiel théorique. La limitation principale résulte des empreintes incomplètes sur les bâtiments de forme complexe et des objets non détectés. Concernant l'estimation des hauteurs pour les cuves, on peut observer que les disparités sur les toits indiquent peu d'information sur leur altitude. La mesure monoscopique est donc indispensable et le résultat obtenu sur le 3-D est alors très satisfaisant, représentant une composition de la scène proche de la réalité terrain. Pour les bâtiments, les altitudes trouvées résultent essentiellement de mesures stéréoscopiques car peu d'échos du bord du toit sont détectés. L'erreur altimétrique obtenue est également satisfaisante pour les couples d'angle stéréoscopique 10° . A 30° , la précision altimétrique est trois fois moins bonne. Les erreurs de disparités sont sans doute dues aux trop fortes dissimilarités radiométriques entre les deux vues.

Nous pouvons conclure que cette chaîne est surtout sensible à la qualité de l'extraction des structures. Cette extraction est performante pour les objets dont l'image radar correspond au modèle recherché, c'est-à-dire une structure brillante située dans une zone homogène et plus foncée. Si les structures sont bien extraites, le calcul du MNT, la localisation planimétrique des structures et l'estimation des hauteurs peuvent être très précis. Les empreintes des bâtiments pourront alors être complétées en utilisant une information supplémentaire sur le côté opposé à la direction de visée.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons proposé une chaîne radargrammétrique en haute résolution. Le bruit, les nombreux échos forts et les dissimilarités radiométriques et géométriques entre les deux images stéréoscopiques, rendent difficile la mise en correspondance ainsi que l'estimation de la hauteur du bâti. Dans ce contexte, nous avons analysé des images copolaires représentant des scènes industrielles, exposé une méthode d'extraction des structures cylindriques et parallélépipédiques sur les images d'amplitude et mis en œuvre les traitements conduisant au 3-D.

Tout d'abord, l'opportunité de données copolaires issues du capteur aérien RAMSES et celle de la radargrammétrie en haute résolution ont été étudiées. Cette analyse s'est articulée en deux parties : une analyse des images d'amplitude et une analyse en stéréoscopie.

Compte-tenu de certains phénomènes spéculaires, nous avons proposé l'interprétation simplifiée de l'image radar de structures industrielles. L'écho double, issu du coin diédrique sol/structure, est généralement responsable sur les images de structures brillantes en forme de 'L' pour les bâtiments rectangulaires et d'arcs de cercles pour les cuves. Le toit et l'ombre étant souvent peu marqués, cet écho peut être utilisé pour détecter la présence d'une structure industrielle de grande ou moyenne taille. Par ailleurs, le modèle multiplicatif des intensités n'est pas valide en présence d'échos forts. En incluant les lois appropriées à la description statistique des images radar, l'algorithme de classification non supervisée ICE-MPM-GEMI [GIORDANA96] nous a permis de proposer la loi Lognormale comme densité de probabilité des amplitudes.

En stéréoscopie, un modèle théorique a été calculé pour évaluer le potentiel d'un couple stéréoscopique de configuration quelconque. Ce modèle nous a permis de mesurer le potentiel des couples RAMSES disponibles. Nous avons ensuite étudié l'information 3-D obtenue par l'appariement des échos forts qui sont susceptibles d'être issus de réflecteurs différents sur le terrain. La mise en correspondance manuelle des échos forts ponctuels aboutit à des points 3-D compatibles avec l'interprétation simplifiée des images. Sur des structures brillantes circulaires, la précision du pointé manuel est altérée par l'épaisseur et l'irrégularité des échos forts. La cohérence entre l'interprétation et les points reconstruits n'est alors obtenue qu'après une extraction semi-automatique de toute la structure brillante. Nous avons pu ainsi conclure sur la pertinence de l'appariement automatique des échos forts.

Suite à cette analyse, nous avons proposé une chaîne radargrammétrique en deux étapes : l'extraction des structures puis du 3-D.

Une méthode originale est présentée pour extraire les structures industrielles. Elle consiste à extraire les structures brillantes en forme de 'L' ou de demi-couronnes. Pour cela, à partir de la détection de primitives d'initialisation, la meilleure forme, rectangle ou demi-couronne, englobant la structure brillante, linéaire ou circulaire, est recherchée par optimisation d'un critère surfacique. Ce critère mesure le contraste statistique entre la forme composée d'une forte densité d'échos forts et une boîte englobante regroupant une partie du toit et du sol. Les résultats révèlent que cette méthode est performante pour extraire les structures brillantes irrégulières. Cependant, elle est moins fiable lorsque l'écho devient trop faible ou en cas de forte densité d'échos forts dans le fond due par exemple à la proximité de structures.

A partir de cette extraction, nous avons mis en œuvre des traitements conduisant au MNE. Les altitudes du sol sont calculées par un algorithme classique. Pour estimer la hauteur des objets détectés, nous avons proposé une méthode simple consistant à fusionner des mesures stéréoscopiques et

monoscopiques. Les résultats 3-D nous permettent de conclure sur la pertinence de l'approche proposée. En effet, les structures les plus importantes sont restituées, au moins partiellement, alors qu'un algorithme de mise en correspondance classique ne permet pas de toutes les restituer. Qualitativement, la hauteur des structures est relativement bien estimée par rapport à la potentialité stéréoscopique du couple dans le cas où des échos du toit existent.

Contributions

Les analyses effectuées dans la première partie de cette thèse fournissent une aide pour la compréhension et l'exploitation des images radar haute résolution. D'une part, nous avons mis en évidence que sur ces images copolaires, la présence des échos doubles explique l'apparence des MNE obtenus par une méthode classique où les altitudes trouvées sont essentiellement celle du sol. D'autre part, l'étude statistique des amplitudes par l'algorithme de classification ICE-MPM-GEMI est une approche originale d'analyse qui pourrait devenir systématique. Enfin, la vérification de la validité de l'appariement des échos forts est essentielle. Elle justifie en effet l'approche adoptée pour la radargrammétrie haute résolution avec ce type de données.

La chaîne algorithmique proposée traite un problème nouveau qui est l'extraction des structures 3-D à partir des échos forts. Notre apport essentiel dans cette chaîne est la méthode d'extraction des objets par les structures brillantes. Son originalité est de rechercher une forme paramétrée englobant les échos forts par exploitation d'un contraste statistique. Plusieurs critères ont été mis au point pour répondre au cas où les lois statistiques des images ne sont pas précisément connues. Nous avons également adapté des techniques stochastiques d'optimisation du critère.

Alors que dans la plupart des travaux utilisant des données RSO haute résolution, on cherche à supprimer les échos forts pour limiter les ambiguïtés, nous avons montré qu'ils apportent une information 3-D pertinente et que leur utilisation est indispensable sur nos images copolaires en bande S et avantageuse en bande X.

Perspectives

Les perspectives sont nombreuses que ce soit sur les méthodes proposées ou sur le 3-D par imagerie radar haute résolution. Dans cette thèse, nous avons traité des images copolaires dans une configuration stéréoscopique simple : trajectoires parallèles, angles Doppler presque nuls. Plusieurs points pourront être approfondis.

Premièrement, l'élargissement de la méthode à l'extraction multi-objets est en perspective. Pour cela, une voie possible serait de détecter d'abord les bâtiments. La méthode d'extraction pourra être enrichie par le traitement des bâtiments de forme complexe. De plus, l'exploitation conjointe des ombres et des repliements sur les images en bande X permettrait d'obtenir une extraction des bâtiments plus complète. La partie concernant l'obtention du 3-D, ce qui correspond au chapitre 4 de cette thèse, pourra faire l'objet d'une recherche approfondie. Un premier travail intéressant serait de se placer en monoscopie avec un MNT donné par une réalité terrain pour étudier plus précisément la potentialité de la mesure des hauteurs par le repliement et si possible, par l'ombre.

Deuxièmement, la généralisation des méthodes proposées pour le traitement d'images stéréoscopiques avec des trajectoires croisées et des visées opposées pourra être effectuée. Dans ce contexte, les échos doubles extraits ne seront pas appariés mais permettront d'obtenir des empreintes sur les structures plus précises. Les données stéréoscopiques fourniront alors l'information 3-D sur les autres pixels. Comme dans [BOLTER00a], l'utilisation de deux images acquises sous une même visée et une

troisième en visée opposée serait intéressante. Les deux premières serviraient à la mise en correspondance et au calcul des altitudes et la troisième à compléter ou corriger les empreintes.

Troisièmement, l'utilisation d'images contrapolaires permettrait peut être d'obtenir des empreintes à partir des textures sur les toits. Une vue copolaire pourra dans ce cas servir à la détection d'une structure grâce aux échos forts. Enfin, la méthode d'extraction des structures pourra être utilisée sur une seule image d'amplitude dans un contexte interférométrique.

ANNEXES

ANNEXE A. Systèmes SAR imageurs

Principaux SAR spatiaux

année	nom	bande	multi-incidence	résolution	polarimétrique
1972	ALSE (Appolo Lunar Sounder Experiment)				
1978	SEASAT	L	non	25m	HH
1981	SIR-A (Satellite Imaging Radar)	L	non	40m	HH
1984	SIR-B	L	oui	20-58m	HH
1989	MAGELLAN (Vénus)	S	-	75m	-
1991	ERS-1 (European Ressource Satellite)	C	non	20m	VV
1992	JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite)	L	non	18m	HH
1994	SIR-C Avec X-SAR	C,L X	oui oui	9-200m	oui VV
1995	ERS-2	C	non	20m	VV
1995	RADARSAT	C	oui	6.25-100m	HH
2000	SRTM	C,X	InSAR	30 ou 90m	VV,HH
2001	ENVISAT	C	oui	<10m	oui
2001	RADARSAT-2	C	oui	3-100m	oui
2002	ALOS	L	oui	7-100m	oui

Quelques SAR aéroportés actuels

nom	bande	multi-incidence	résolution min	polarimétrique
Aes 1,2,3 (AeroSensing Radar Systeme)	X,P,L,C	oui	0.5m	
DOSAR (Dornier)	Ka,X,C	InSAR	1m	oui (sauf Ka)
STAR-3i (ERIM, DARPA)	X	oui	3m	
RAMSES (ONERA)	toutes	oui, InSAR	-	oui
E-SAR (DLR)	X,C,S,L,P	oui	0.8m	oui
MEMPHIS (FGAN)	Ku	oui, InSAR	0.75m	oui
AER-II (FGAN)	X	oui, InSAR	1m	oui

InSAR= SAR interférométrique

ANNEXE B. Estimation statistique de paramètres

Rappel sur l'estimation statistique ([COULON], [BOUCHER96])

La problématique est la suivante : on observe une réalisation x du vecteur aléatoire X qui suit une loi de probabilité $p_X(x)$. Cette loi dépend de M paramètres qui définissent le vecteur a . On cherche à estimer le vecteur a qui est à l'origine de la réalisation observée x . Cette estimée est notée \hat{a} . Chaque observation d'une réalisation x permet de calculer une estimation du vecteur \hat{a} . X étant un vecteur aléatoire, \hat{a} est donc un vecteur aléatoire. On définit :

- la loi *a priori*, avant toute observation de réalisations x : $p_A(a)$
- la loi *a posteriori*, conditionnelle à l'observation de x : $p_A(a/x)$

On rappelle la loi de Bayes : $p(a/x)p(x) = p(x/a)p(a)$

Méthode des Moments (MM)

On calcule les expressions des moments d'ordre 1,2,... faisant intervenir les paramètres à estimer, de telle sorte que l'on puisse résoudre un système de M équations à M inconnues.

Maximum de Vraisemblance (MV)

L'estimée \hat{a} est le vecteur des paramètres qui maximise la densité de probabilité conditionnelle, $p(x/a)$ appelée fonction de vraisemblance :

$$\left. \frac{\partial p(x/a)}{\partial a_k} \right)_{\hat{a}_{k,MV}} = 0 \text{ ou } \left. \frac{\partial \ln p(x/a)}{\partial a_k} \right)_{\hat{a}_{k,MV}} = 0, \text{ avec } 1 \leq k \leq M$$

Méthode du risque minimum

Lorsque la forme de la distribution *a priori* $p_A(a)$ est connue, l'estimation peut être faite en minimisant l'erreur commise entre l'estimée \hat{a} et le vecteur a à l'origine de la réalisation x . L'erreur est exprimée par l'espérance d'un coût ou fonction de perte : $E_A(c(a, \hat{a}))$. On a :

$$E_A(c(a, \hat{a})) = \int_a c(a, \hat{a}) p_A(a) da = \int_x \left(\int_a c(a, \hat{a}) p(a/x) da \right) p_X(x) dx$$

Chaque terme sous l'intégrale étant positif, la méthode du risque minimum revient à minimiser par rapport à \hat{a} l'expression :

$$\int_a c(a, \hat{a}) p(a/x) da$$

L'estimateur du maximum *a posteriori* (MAP) correspond au coût uniforme sauf sur une plage $\pm\Delta$ très petite où il est nul :

$$\left. \frac{\partial p(a/x)}{\partial a_k} \right)_{\hat{a}_{k,MAP}} = 0, \text{ avec } 1 \leq k \leq M$$

Performance d'un estimateur

Les estimations sont qualifiées par :

- le biais : si a est non aléatoire, le biais est défini par : $E_{X/a}(\hat{a}) - a$ avec

$$E_{X/a}(\hat{a}) = \int_x \hat{a} \cdot p(x/\hat{a}) dx$$

sinon on calcule le biais moyen : $E_{X,a}(\hat{a}(x)) - E(a)$ avec $E_{X,a}(\hat{a}(x)) = \iint_x \hat{a} \cdot p(x,a) p(a) da dx$

- la variance : si le paramètre est non aléatoire, $V = E_{X/a} \left[\left(E_{X/a}(\hat{a}) - \hat{a} \right)^2 \right]$
sinon : $V = E_{X,a} \left[\left(E_{X,a}(\hat{a}(x)) - \hat{a}(x) \right)^2 \right]$
- la consistance : l'estimateur est consistant lorsque l'estimation \hat{a} tend vers a quand le nombre d'échantillons observés tend vers l'infini, ce qui s'écrit en moyenne quadratique : $\lim_{N \rightarrow \infty} (\hat{a} - a)^2 = 0$.
- l'efficacité : la variance d'un estimateur non biaisé est minorée selon l'inégalité de Cramer-Rao :

$$V \geq - \left[E \left[\frac{\partial^2 \log p(x/a)}{\partial a^2} \right] \right]^{-1}$$

L'estimateur est dit efficace lorsqu'il y a égalité.

Estimation des paramètres de loi par MV, MM et MMI

La plupart des résultats inscrits dans le tableau suivant peuvent être retrouvés dans [JOHNSON70a], [JOHNSON70b], [SIJBERS98] ou se calculent sans difficulté particulière.

Précisons que l'estimation des paramètres pour la loi de Rice se heurte à des problèmes pratiques sur les images radar. Dans une région avec des réflecteurs spéculaires, le coefficient de variation est souvent supérieur à 1/L. L'estimateur MM n'a alors pas de solution. L'estimateur MV admet une solution si $E(a^2) > \tilde{a}_0^2$ (cf. éq. 1-13 ou expression dans le tableau ci-dessous) ce qui est en contradiction avec la signification du modèle d'origine. J. Sijbers [SIJBERS98] propose d'évaluer d'abord σ^2 dans une région homogène sans écho fort, puis a_0 à partir de la première équation de l'estimateur MV. Il montre que si $E(a^2) \leq 2\sigma^2$, $\tilde{a}_0 = 0$ est solution. Sinon, la fonction admet 0 comme minimum et deux maxima. Dans ce cas, la résolution est faite par la méthode de Brent (algorithme décrit dans *Numerical Recipes in C*). J. Sijbers conclut qu'à faible SNR ($SNR = \sigma/a_0$), l'estimation MM est impossible. A fort SNR, elle est biaisée. Il recommande donc d'utiliser dans tous les cas l'estimation MV.

loi	param	densité	moments	estimateur MM	estimateur MV
Gamma généralisée	μ_j L	$\frac{2L^L}{\Gamma(L)\mu_j} a^{2L-1} \exp\left(-\frac{La^2}{\mu_j}\right)$	$E(a^k) = \left(\frac{\mu_j}{L}\right)^{k/2} \frac{\Gamma(L+k/2)}{\Gamma(L)}$ $E(a^2) = \mu_j \cdot \text{var}(a^2) = \mu_j^2 / L$	$\tilde{\mu}_j = E(a^2)$ $\tilde{L} = \tilde{\mu}_j^2 / \text{var}(a^2) = \gamma_j^{-2}$	$\log \tilde{L} - \Psi(\tilde{L}) = \log E(a^2) - E(\log(a^2))$ $\tilde{\mu}_j = E(a^2)$
K	μ_j L α	$\frac{2b}{\Gamma(L)\Gamma(\alpha)} \left(\frac{ba}{2}\right)^{\alpha+L-1} K_{\alpha-L}(ba)$ avec $b = 2\sqrt{\alpha L/\mu_j}$	$E(a^k) = \left(\frac{2}{b}\right)^k \frac{\Gamma(L+k/2)\Gamma(\alpha+k/2)}{\Gamma(L)\Gamma(\alpha)}$ $E(a^2) = (2/b)^2 \alpha L$ $E(a^4) = (2/b)^4 (\alpha+1)(L+1)\alpha L$	$\tilde{\alpha} = \left(\frac{L}{L+1} \frac{E(a^4)}{E(a^2)^2} - 1\right)^{-1}$ avec L connu $\tilde{b} = 2\sqrt{\tilde{\alpha} L / E(a^2)}$ soit $\tilde{\mu}_j = E(a^2)$	Pas de solution explicite simple
Beta I	$0 \leq a \leq B$ $p > 0$ $q > 0$	$\frac{1}{B(p,q)} \frac{a^{p-1}(B-a)^{q-1}}{B^{p+q-1}}$ Hypothèse : B connu	$E(a^k) = B^k \frac{B(p+k, q)}{B(p, q)}$ avec $B(p, q) = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}$	$r = 6(\beta_2 - \beta_1 - 1)/(6 + 3\beta_1 - 2\beta_2)$ $\tilde{p}, \tilde{q} = \frac{1}{2} r \left(1 \pm (r+2)\sqrt{\beta_1((r+2)^2\beta_2 + 16(r+1))^{-1}}\right)$ $p > q$ si $\beta_1 < 0$	$s_1 = E(\log(a-A)/(B-A))$, $s_2 = E(\log(B-a)/(B-A))$ $\Psi(\tilde{p} + \tilde{q}) + \Psi(\tilde{p}) = s_2$, $\Psi(\tilde{p} + \tilde{q}) + \Psi(\tilde{q}) = s_1$ approximation : $\Psi(t) = \log(t-1/2)$ $\tilde{p} = \frac{(1-e^{s_1})}{2(1-e^{s_1}-e^{s_2})}$, $\tilde{q} = \frac{(1-e^{s_2})}{2(1-e^{s_1}-e^{s_2})}$
Beta II	$0 \leq a \leq B$ $p > 0$ $q > 0$	$\frac{1}{B(p,q)} \frac{B^q a^{p-1}}{(B+a)^{p+q}}$	$E(a^k) = B^k \frac{B(p+k, q-k)}{B(p, q)}$	on utilise les estimateurs de la loi Beta I pour la variable $\frac{Ba}{B+a}$	
Lognormale	μ_A σ_A	$\frac{1}{a\sqrt{2\pi}\sigma_A} \exp\left(-\frac{(\log a - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right)$	$E(a) = e^{\mu_A + \sigma_A^2/2}$ $E(a^2) = e^{2\mu_A + 2\sigma_A^2}$	$\tilde{\mu}_A = \log(E(a)^2 / \sqrt{E(a^2)})$ $\tilde{\sigma}_A^2 = \log(E(a^2) / E(a)^2)$	$\tilde{\mu}_A = E(\log a)$ $\tilde{\sigma}_A^2 = \text{var}(\log a)$
Weibull	β α	$\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{a}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{a}{\beta}\right)^\alpha\right)$	$E(a^k) = \beta^k \Gamma(k/\alpha + 1)$	$\beta_1 = \frac{[\Gamma(3\tilde{\alpha}+1) - 3\Gamma(2\tilde{\alpha}+1)\Gamma(\tilde{\alpha}+1) + 2\Gamma(\tilde{\alpha}+1)^3]}{[\Gamma(2\tilde{\alpha}+1) - \Gamma(\tilde{\alpha}+1)]^2}$ $\tilde{\beta} = \frac{\text{var}(a)}{\Gamma(2\tilde{\alpha}+1) - \Gamma(\tilde{\alpha}+1)^2}$	$\tilde{\alpha} = \left[\frac{E(a^{\tilde{\alpha}} \log(a))}{E(a^{\tilde{\alpha}})} - E(\log(a))\right]^{-1}$ $\tilde{\beta} = E(a^{\tilde{\alpha}})^{1/\tilde{\alpha}}$
Rice généralisée	σ^2 a_0 L	$\frac{aL}{\sigma^2} \left(\frac{a}{a_0}\right)^{L-1} \exp\left(-L \frac{a^2+a_0^2}{2\sigma^2}\right) I_{L-1}\left(\frac{aa_0L}{\sigma^2}\right)$ Hypothèse : L connu	$E(a^2) = 2\sigma^2 + a_0^2$ $E(a^4) = 2\sigma^4(1+1/L)(2\sigma^2+2a_0^2) + a_0^4$	si $\gamma_j^2 < 1/L : 2\tilde{\sigma}^2 = E(a^2) \left[1 \pm \sqrt{1 - L\gamma_j^2}\right]$ si $E(a^2) > 2\tilde{\sigma}^2 : \tilde{a}_0^2 = E(a^2) - 2\tilde{\sigma}^2$	Estimation du $2\tilde{\sigma}^2$ sans signal par exemple sous hypothèse d'un bruit Gamma généralisé $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \frac{I_{L-1}\left(\frac{L\tilde{a}_0}{\sigma^2} a_i\right)}{I_{L-1}\left(\frac{L\tilde{a}_0}{\sigma^2}\right)} = \frac{L-1}{L} \frac{\tilde{\sigma}^2}{\tilde{a}_0}$

Avec : $\beta_1 = E((a-E(a))^2) / \text{var}(a^2)^3$ $\beta_2 = E((a-E(a))^4) / \text{var}(a^2)^2$

Estimation MMI de L pour la loi Gamma généralisée : Estimation MM de L pour la loi K (si possible) :

$$\tilde{L} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E(a)}{E(a^{-1})E(a^2)}\right)^{-1}$$

Estimation MMI de L pour la loi K (si possible) :

$$\tilde{L} = \frac{1}{4} \frac{x-y}{x+y-2z} \left(-1 \mp \sqrt{1 - 8z \frac{(x+y-2z)}{(x-y)^2}}\right)$$

où $x = E(a^2)$, $y = E(a^{-1})E(a^3)$, $z = E(a^{-1})E(a)E(a^2)$

$$\tilde{\alpha} = \frac{1}{2} \left(-\frac{2L}{2L+1} \frac{E(a)}{E(a^{-1})E(a^2)} + 1\right)^{-1}$$

tableau 1 : Distributions et estimateurs MM, MV et MMI

ANNEXE C. Réalités terrain

Nous présentons ici les réalités terrain issues de la BDTopo@IGN, modèle 3-D de précision 1m. Le tableau faisant suite aux images résume le nombre de cuves, de petits bâtiments, de bâtiments de taille moyenne et de bâtiments de grande taille. Ces nombres, estimés manuellement, sont indiqués pour chaque vue radar relative à la zone. Un objet est compté lorsqu'il apparaît à plus d'environ 75% sur la vue.

Sur la zone A (figure 1-20)

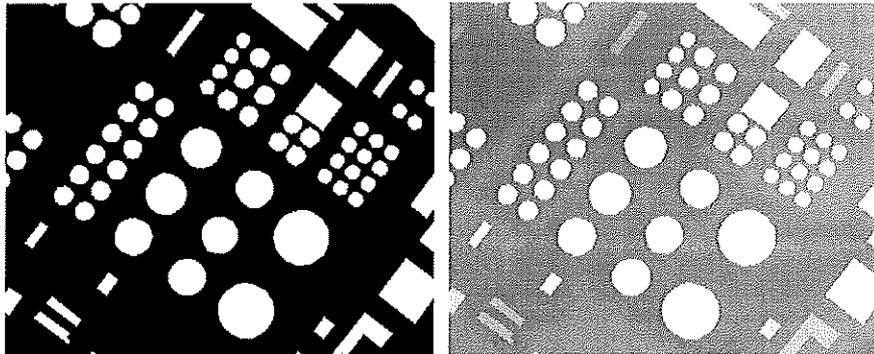


figure 1 : BDTopo ® : objets du sursol et MNE

	Vue 1 et vue 4	Vue 2	Vue 3
Nombre de cuves	55	53	40
Nombre de petits bâtiments	5	4	1
Nombre de bâtiments de taille moyenne	7	5	7
Nombre de grands bâtiments	0	0	0

Sur la zone B (figure 1-21)

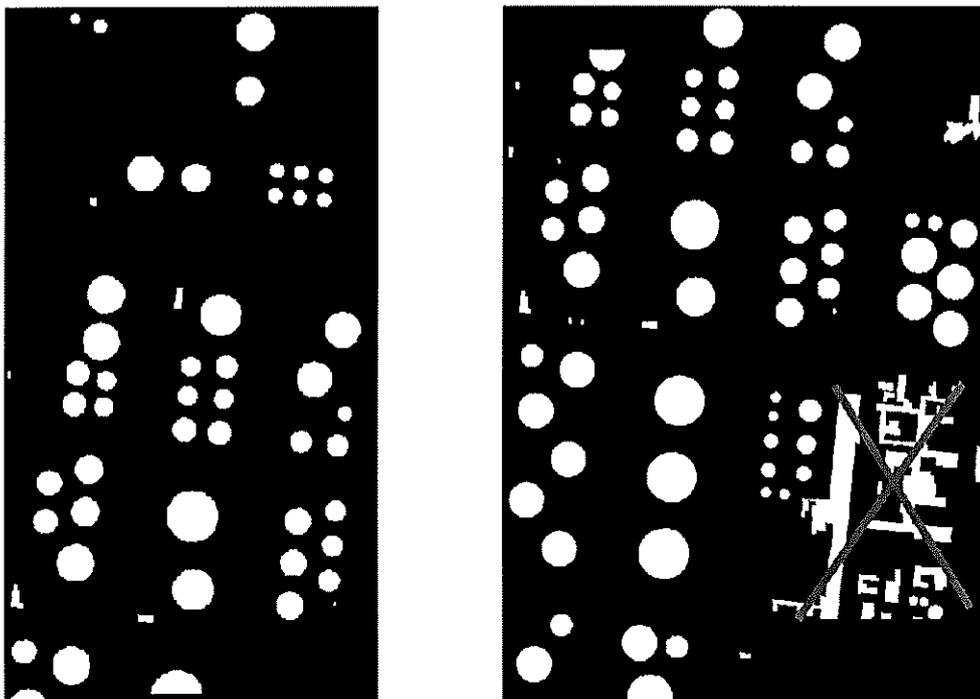


figure 2 : BDTopo ® : objets du sursol sur les vues 1 et 2. La croix correspond à une zone d'amas d'échos forts sur la vue radar

	Vue 1	Vue 2
Nombre de cuves	46	60
Nombre de petits bâtiments	4	7
Nombre de bâtiments de taille moyenne	0	0
Nombre de grands bâtiments	0	1 ¹

Sur la zone C (figure 1-22)

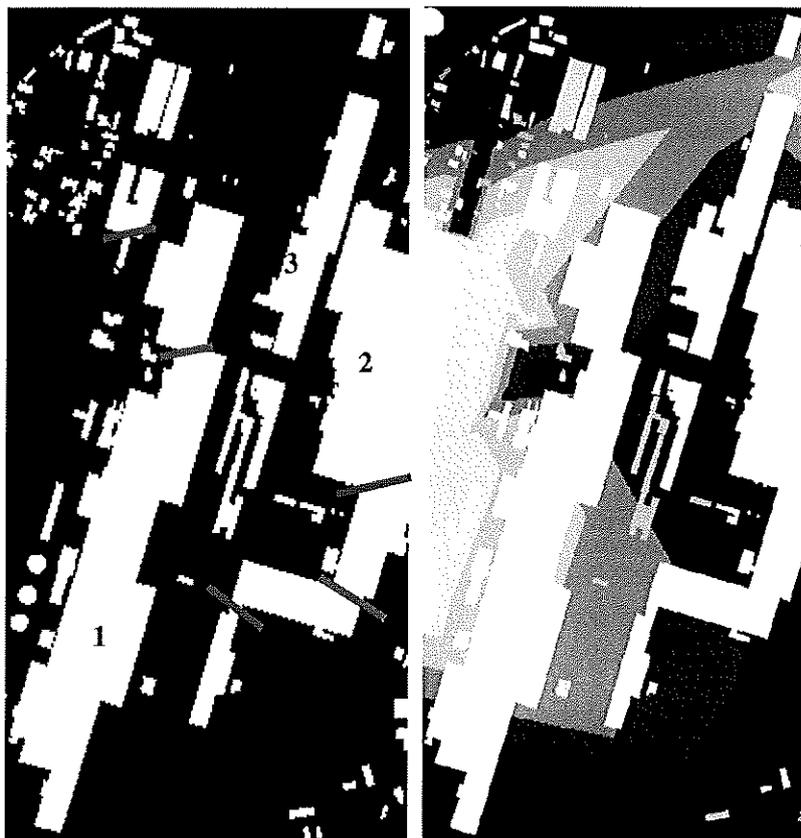


figure 3 : BDTopo © : objets du sursol et MNE. Pour des raisons pratiques, certains bâtiments sont découpés en plusieurs bâtiments (traits épais sur l'image de gauche)

	Vues 1,2,5	Vue 3	Vue 4
Nombre de cuves	3	3	3
Nombre de petits bâtiments	~60	~57	~56
Nombre de bâtiments de taille moyenne	14 / 7 'L'	13 / 7 'L'	11 / 7 'L'
Nombre de grands bâtiments	12 / 12 'L'	12 / 12 'L'	10 / 9 'L'

A.1

¹ On a ici compté un grand bâtiment au lieu d'un bâtiment allongé, de petits bâtiments et de quelques petites cuves car cette région se traduit par des amas d'échos forts dans la vue radar (zone sous la croix dans la figure 3).

Sur la zone D (figure 1-23)

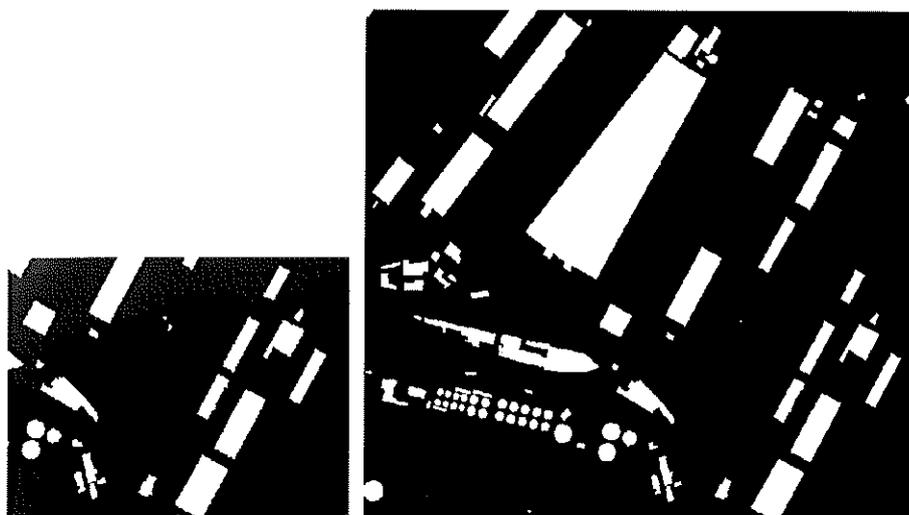


figure 4 : BDTopo © : objets du sursol pour les deux vues radar 1 et 2

	Vue 1	Vue 2
Nombre de cuves	3	27
Nombre de petits bâtiments	11	~38
Nombre de bâtiments de taille moyenne	10 / 8 'L'	18 / 16 'L'
Nombre de grands bâtiments	0	3 / 3 'L'

ANNEXE D. Classification ICE-MPM-GEMI

Quelques éléments de l'algorithme [GIORDANA96], [FOUQUE02]

Cet algorithme de classification est non supervisé et repose sur des chaînes de Markov cachées. On considère que l'image est la réalisation bruitée Y d'une variable aléatoire X qui prend ses valeurs dans un ensemble fini de C classes. Faisant l'hypothèse que C classes sont représentées dans l'image, la classification vise à retrouver X_s en chaque pixel s à partir de l'observation Y . Les algorithmes de segmentation markovienne résolvent ce problème d'estimation en considérant que X est markovien, c'est-à-dire que la probabilité en un site conditionnellement à toute l'image Y , ne dépend que de son voisinage. De plus, on fait l'hypothèse que les probabilités de Y_s sachant X sont indépendantes entre pixels et égales aux probabilités de Y_s sachant X_s seulement.

A chaque itération, une classification est proposée : la décision bayésienne MPM (*Maximum Posterior Mode*) consiste à affecter le pixel s à la classe qui maximise la probabilité marginale *a posteriori*, $\text{Max}_{i=1..C} P(X_s = i / Y = y)$.

L'algorithme repose sur l'utilisation de chaînes de Markov plutôt que de champ de Markov. Le passage de l'image 2-D à une chaîne 1-D est réalisée par le parcours de Peano, décrit comme conservant bien les relations de voisinage. Dans une chaîne de Markov, la probabilité en X_s ne dépend que du site précédent X_{s-1} . Les probabilités *a priori* peuvent ainsi être calculées dans toute l'image à partir de celle au premier site, appelée loi initiale, et d'une matrice de transitions. La loi initiale, les probabilités de transitions et les probabilités *a posteriori* s'expriment analytiquement en fonction de probabilités *Backward* et *Forward*. La modélisation par chaînes de Markov permet ainsi d'accélérer considérablement le temps de calcul par rapport aux champs de Markov où la probabilité *a posteriori* doit être estimée par tirage aléatoire. Le passage en 1-D a néanmoins pour conséquence de créer un effet de bloc autour des frontières.

Les probabilités *Backward* et *Forward* se calculent récursivement pour tous les pixels à partir des lois initiales et probabilités de transitions issues de l'étape précédente. La mise à jour des probabilités initiales et de transitions est alors réalisée par l'algorithme ICE (*Iterative Conditional Estimation*).

Dans le cadre d'un mélange de lois généralisé, l'approche GEMI (*Generalized Mixture*) consiste à attribuer une distribution (Gauss, Beta, ...) à chaque classe et à chaque itération. Pour décider quel type de loi correspond à la classe, les paramètres de loi sont estimés dans chaque classe pour une famille de lois et la loi retenue est celle qui minimise un coût. Nous utilisons comme coût, la distance EQM (Erreur Quadratique Moyenne) entre histogrammes normalisés empiriques et théoriques :

- pas de l'histogramme : pas
- nombre de niveaux de gris : $N_intervalle$
- histogramme empirique pour la classe c : $\left\{ \frac{h_c(i)}{\sum_{i=1}^{N_intervalle} h_c(i)} \right\}_{i \in [1, N_intervalle]}$
- histogramme théorique pour la loi d de densité de probabilité f_d : $\left\{ pas \cdot f_d \left(i - 1 + \frac{pas}{2} \right) \right\}_{i \in [1, N_intervalle]}$

$$distEQM(c,d) = \frac{1}{N_intervalle} \sum_{i=1}^{N_intervalle} \left(\frac{h_c(i)}{\sum_{j=1}^{N_intervalle} h_c(j)} - pas.f_u(i-1 + \frac{pas}{2}) \right)^2$$

La mise à jour des probabilités d'appartenance *a posteriori* dépend alors des lois attribuées aux *C* classes.

L'initialisation est assurée par *C* gaussiennes équiprobables et l'algorithme s'arrête après un nombre maximal d'itérations, fixé à 30 dans nos applications.

Résultats

Images en géométrie radar

Le tableau suivant indique la ddp retenue à l'issue de la classification pour chacune des trois classes, ainsi que l'estimateur qui a servi à calculer les paramètres de la loi.

ZONE	image	pixels sombres	sol	échos forts
A	vue 1 (SHh)	gam. MMI	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (SHh)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 3 (SHh)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 4 (XHh)	logn. MM	logn. MM	logn. MV
B	vue 1 (XVv)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (XVv)	gauss	logn. MM	logn. MV
C	vue 1 (SHh)	logn. MV	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (SHh)	gam. MMI	logn. MM	logn. MV
	vue 3 (SHh)	logn. MM	logn. MM	logn. MV
	vue 4 (XHh)	gam. MV	logn. MM	logn. MV
	vue 5 (XHh)	logn. MV	logn. MM	logn. MV
D	vue 1 (XVv)	logn. MV	logn. MV	logn. MV
	vue 2 (XVv)	logn. MV	logn. MM	logn. MV

Images géoréférencées

Ces images sont étudiées plus en détail car les traitements d'extraction de structures décrits dans le chapitre 3, seront effectués sur ces images. Les images sont toutes géoréférencées avec un même pas au sol, *TDS*. Notons que ce pas ne doit pas être confondu avec la taille du pixel au sol TD_{sol} (cf. chapitre 1, section I.2.2.1). Le premier tableau fournit les ddp trouvées par classe. Le second tableau fournit les moyennes calculées sur les 13 images pour chaque classe pour : la moyenne μ , l'écart-type σ et le coefficient de variation σ/μ . L'objectif de cette énumération est d'étudier si les trois classes ont des propriétés très différentes l'une par rapport à l'autre.

ZONE	image	pixels sombres	sol	échos forts
		loi	loi	loi
A	vue 1 (SHh)	gam. MMI	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (SHh)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 3 (SHh)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 4 (XHh)	logn. MM	logn. MM	logn. MV
B	vue 1 (XVv)	gauss	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (XVv)	gauss	logn. MM	logn. MV
C	vue 1 (SHh)	logn. MV	logn. MM	logn. MV
	vue 2 (SHh)	gam. MMI	logn. MM	logn. MV
	vue 3 (SHh)	logn. MM	logn. MM	logn. MV
	vue 4 (XHh)	gam. MV	logn. MM	logn. MV
	vue 5 (XHh)	logn. MV	logn. MM	logn. MV
D	vue 1 (XVv)	logn. MV	logn. MV	logn. MV
	vue 2 (XVv)	logn. MV	logn. MM	logn. MV

image	pixels sombres			sol			échos forts		
	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ
MINIMUM	0.07	0.02	0.27	0.15	0.04	0.26	0.46	0.44	0.79
MAXIMUM	0.74	0.55	3.5	1.37	0.38	0.38	4.97	6.31	1.27
MOYENNE	0.19	0.15	1.01	0.37	0.11	0.30	1.31	1.40	1.05
ECART-TYPE	0.16	0.15	1.11	0.29	0.08	0.03	1.06	1.35	0.12

Le dernier tableau indique les distances EQM (DEQM) en pourcentage et la réponse du test de Kolmogorov-Smirnov (TKS), positif pour une similitude supérieure à 95%, entre l'histogramme empirique d'une classe et la distribution Lognormale. Les paramètres de la distribution Lognormale sont estimés par MV et MM. L'estimation aboutissant aux meilleures mesures de DEQM et TKS est conservée.

ZONE	image	pixels sombres		sol		échos forts	
		TKS	DEQM	TKS	DEQM	TKS	DEQM
A	vue 1 (SHh)	1	0.2	1	0.1	0	0.1
	vue 2 (SHh)	1	1.0	1	0.2	0	0.1
	vue 3 (SHh)	1	0.8	1	0.1	0	0.1
	vue 4 (XHh)	1	0.1	1	0.1	0	0.1
B	vue 1 (XVv)	1	0.8	1	0.4	0	0.2
	vue 2 (XVv)	1	0.8	1	0.2	0	0.1
C	vue 1 (SHh)	1	0.3	1	0.1	0	0.1
	vue 2 (SHh)	1	0.2	1	0.1	0	0.1
	vue 3 (SHh)	1	0.3	1	0.1	0	0.1
	vue 4 (XHh)	0	2.4	1	0.5	0	0.2
	vue 5 (XHh)	0	0.3	1	0.2	0	0.1
D	vue 1 (XVv)	1	0.7	1	0.3	0	0.2
	vue 2 (XVv)	0	0.5	1	0.3	0	0.3

ANNEXE E. Compléments sur l'analyse stéréoscopique

Résolution du calcul 3-D par moindres carrés

Pour chacun des deux pixels appariés, l'indice de colonne fournit la distance et l'indice de ligne donne l'instant où est imagé le point et donc les positions, vitesses et Doppler instantanés. On souhaite alors résoudre le système normalisé suivant, à quatre équations et trois inconnues, qui sont les coordonnées du point P sur le terrain :

$$\begin{cases} \frac{r_k^2 - S_k P^2}{\sigma_{dk}} = 0 \\ \frac{r_k \sin \tau_k V_k - \overrightarrow{S_k P} \cdot \overrightarrow{V_k}}{\sigma_{fk}} = 0 \end{cases}, k = 1, 2$$

La résolution est effectuée par moindres carrés. Le point P est initialisé à mi-chemin entre les deux points résultant de la projection des pixels gauche et droit à une altitude donnée. L'erreur de localisation, dP , sur P est minimisée itérativement par linéarisation. A l'itération n :

$$dP = \overrightarrow{P_{n-1} P_n} = \begin{pmatrix} x_1^{(n-1)} - x_1^{(n)} & x_2^{(n-1)} - x_2^{(n)} & x_3^{(n-1)} - x_3^{(n)} \end{pmatrix}^T$$

$$\begin{cases} \frac{r_k^2 - S_k P_{n-1}^2 - dP^2 - 2\overrightarrow{S_k P_{n-1}} \cdot \overrightarrow{dP}}{\sigma_{dk}} = 0 \\ \frac{r_k \sin \tau_k V_k - \overrightarrow{S_k P_{n-1}} \cdot \overrightarrow{V_k} - \overrightarrow{dP} \cdot \overrightarrow{V_k}}{\sigma_{fk}} = 0 \end{cases}, k = 1, 2$$

En négligeant les erreurs du second ordre, dP^2 , l'erreur est solution de l'équation matricielle :

$$AdP = Y$$

avec :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{x_1^{n-1} - s_1^{x1}}{\sigma_{d1}} & \frac{x_2^{n-1} - s_1^{x2}}{\sigma_{d1}} & \frac{x_3^{n-1} - s_1^{x3}}{\sigma_{d1}} \\ \frac{x_1^{n-1} - s_2^{x2}}{\sigma_{d2}} & \frac{x_2^{n-1} - s_2^{x2}}{\sigma_{d2}} & \frac{x_3^{n-1} - s_2^{x3}}{\sigma_{d2}} \\ \frac{v_1^{x1}}{\sigma_{f1}} & \frac{v_1^{x2}}{\sigma_{f1}} & \frac{v_1^{x3}}{\sigma_{f1}} \\ \frac{v_2^{x1}}{\sigma_{f2}} & \frac{v_2^{x2}}{\sigma_{f2}} & \frac{v_2^{x3}}{\sigma_{f2}} \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} \frac{1}{2\sigma_{d1}} (r_1^2 - S_1 P_{n-1}^2) \\ \frac{1}{2\sigma_{d2}} (r_2^2 - S_2 P_{n-1}^2) \\ \frac{r_1 \sin \tau_1 V_1 - \overrightarrow{S_1 P_{n-1}} \cdot \overrightarrow{V_1}}{\sigma_{f1}} \\ \frac{r_2 \sin \tau_2 V_2 - \overrightarrow{S_2 P_{n-1}} \cdot \overrightarrow{V_2}}{\sigma_{f2}} \end{pmatrix}$$

Selon les moindres carrés, la solution s'écrit : $dP = (A^T A)^{-1} A^T Y$. Le nouveau point P est déduit et le procédé est répété jusqu'à convergence. La convergence est atteinte pour un nombre maximal d'itérations ou/et un déplacement suffisamment faible du point. Nous constatons que pour un point, seules quelques itérations suffisent pour converger.

Simulation de trajectoires nominales

Nous présentons comment sont générées des trajectoires nominales (rectiligne uniforme) à partir d'une trajectoire de référence, selon un angle de croisement donné et telle que l'angle stéréoscopique à la moitié de l'acquisition des deux images fictives correspondent à l'angle voulu. L'angle stéréoscopique $\Delta\theta$ varie entre 5 et 60° et l'angle d'intersection G prend les valeurs 0, 20, 45 et 180°. La trajectoire nominale de référence est décrite par les paramètres suivants :

- système : PRF_1, NR_1, TD_1, f_0 (bande), fréquence Doppler nulle et angle d'incidence $\theta_1 = 20^\circ$
- trajectoire : vecteur vitesse constant $\vec{V}_1 = (V_1^x, V_1^y, 0)^T$
 position capteur en chaque ligne $\{S_{1,k} = (S_{1,k}^x, S_{1,k}^y, S_{1,k}^z)\}, k \in [1, NLIG_1]$

Pour construire la seconde trajectoire, certains paramètres sont supposés constants : PRF_1, TD_1, f_0 , la norme du vecteur vitesse V_1 et $V_2^z = V_1^z = 0$. Les autres paramètres se calculent suivant des relations géométriques simples pour chaque choix d'angle de croisement et d'angle stéréoscopique (figure 5). L'angle d'incidence droit varie donc entre $\theta_2 = 25^\circ$ et $\theta_2 = 80^\circ$.

Le vecteur vitesse \vec{V}_2 vérifie :
$$\begin{cases} \vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2 = V_1^2 \cos G \\ \vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2 = V_1^2 \sin G \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} V_2^x = V_1^x \cos G - V_1^y \sin G \\ V_2^y = V_1^y \cos G + V_1^x \sin G \end{cases}$$

Les positions des capteurs à la moitié de l'acquisition sont reliées par :

$$S_{2,u} = S_{1,u} + y_1 \vec{V}_1^\perp / V_1 - y_2 \vec{V}_2^\perp / V_2 \quad \text{avec} \quad u = NLIG_1 / 2 \quad \text{et} \quad y_1 = r_1 \sin \theta_1 \quad \text{et} \quad r_1 = S_{1,u}^z / \cos \theta_1$$

A partir de la position trouvée en u , on calcule la position initiale et les positions suivantes :

$$\begin{cases} S_{2,k}^x = S_{2,0}^x + k.V_2^x / PRF_1 \\ S_{2,k}^y = S_{2,0}^y + k.V_2^y / PRF_1 \\ S_{2,k}^z = S_{2,0}^z \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} S_{2,0}^x = S_{2,u}^x - u.V_2^x / PRF_1 \\ S_{2,0}^y = S_{2,u}^y - u.V_2^y / PRF_1 \\ S_{2,0}^z = S_{2,u}^z \end{cases}$$

Des exemples de trajectoires pour $\Delta\theta = 30^\circ$ sont présentés sur la figure 6.

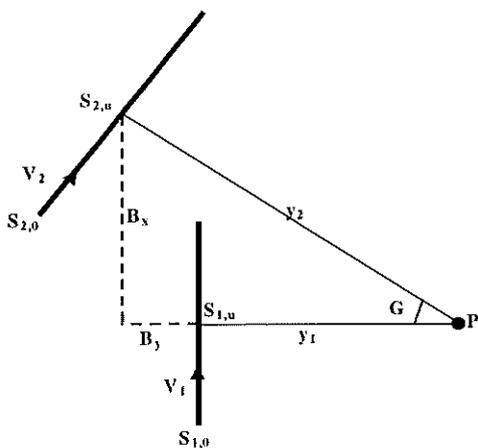


figure 5 : trajectoire de référence (1) et trajectoire croisée (2)

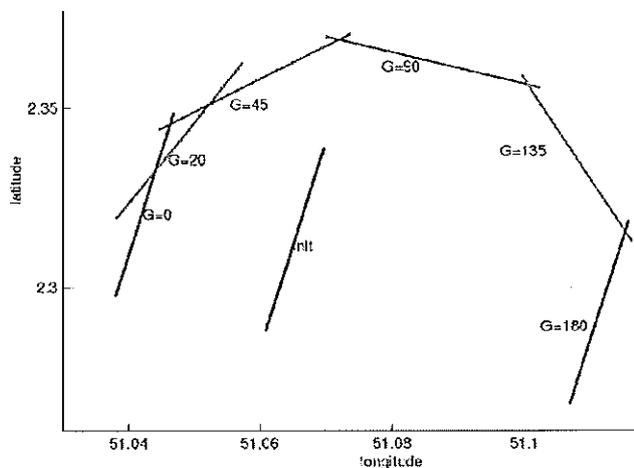


figure 6 : trajectoires simulées pour $\Delta\theta = 30^\circ$

Evaluation du potentiel géométrique des données RAMSES en pixel sol

zone	couple	$\Delta\theta$	impact d'une erreur de disparité en colonne sur l'altimétrie	impact erreur monoscopique en altimétrie (repliement)
A	vuc1+vuc2	10	1.6	0.6
	vuc1+vuc3	25	1.3	0.6
	vuc2+vuc3	15	1.4	0.7
	vuc4+vuc2	5	1.9	0.7
B	vuc2+vuc1	5	5.5	0.6
C	vuc1+vuc2	10	1.7	0.6
	vuc1+vuc3	30	0.7	0.6
	vuc2+vuc3	20	1.3	0.7
	vuc5+vuc4	10	2.2	0.6
D	vuc1+vuc2	5	4.0	0.6

erreur en altimétrie en pixel sol de taille *TDS* (unité **ps**) pour une erreur de disparité de 1 colonne en stéréoscopie et impact de l'erreur de la mesure monoscopique de 1 pixel sur la hauteur par l'estimation de la longueur du repliement

ANNEXE F. Simulation d'images de demi-couronnes brillantes

Une méthode de simulation d'images radar de demi-couronnes réalistes a été développée pour tester la performance des algorithmes d'extraction des échos forts circulaires. Cette simulation se décompose en quatre phases :

- la création de l'image vérité terrain,
- la création d'une image réaliste de classification des pixels,
- la création de l'image des amplitudes suivant une distribution Lognormale,
- la simulation de l'effet de pondération tel qu'il paraît sur les images traitées.

Image vérité

Le centre de la couronne est fixé au centre de l'image. La demi-couronne est définie à partir de quatre paramètres :

- rayon r et épaisseur e ,
- direction de visée en ligne dy et en colonne dx .

Image de classification réaliste

Pour être plus réaliste, la forme n'est pas constituée par le nombre total de points à l'intérieur de la demi-couronne, N_r , mais par un nombre N , aléatoirement choisi entre 20 et 50% de $2\pi r$, soit théoriquement $2N/(e+1)$. Ces N points sont choisis aléatoirement. Des échos forts ponctuels sont aussi ajoutés dans le fond au nombre de N_e , tel que la densité d'échos forts dans le fond soit comprise entre 1 et 25% de πr .

Image des amplitudes

Les amplitudes des pixels du fond et de la forme sont modélisées par deux lois Lognormale. L'image de classification est d'abord transformée en une image d'amplitude non bruitée. Etant donné un contraste C entre les deux régions, les moyennes des amplitudes dans le fond (indice 2) et sur les échos forts (indice 1) sont fixées à : $\mu_2 = 1$, $\mu_1 = C$

Pour produire des images décrites par une loi Lognormale, nous utilisons un bruit multiplicatif de loi Lognormale de moyenne 1 et de variance σ_{sk}^2 . En effet, la variable aléatoire $A = S.R$ à R constante suit alors une loi Lognormale de moyenne $\mu_A = R$ et de variance $\text{var}(A) = R^2 \sigma_{sk}^2$. Nous avons donc :

$$\sigma_k^2 = \mu_k^2 \sigma_{sk}^2 \quad \text{avec } k = 1 \text{ ou } 2, \mu_k \text{ la moyenne dans la région } k \text{ et } \sigma_k^2 \text{ la variance}$$

En se basant sur les résultats de classification (tableau 3, ANNEXE D), il a été choisi :

$$\sigma_{s1} = 1.05, \sigma_{s2} = 0.30$$

Les paramètres de la loi Lognormale du bruit $(\mu_{sk}, \sigma_{sk}^2)$ sont alors calculés par les relations :

$$\sigma_{sk}^2 = \log(\sigma_k^2 + 1) \text{ et } \mu_{sk} = -\sigma_{sk}^2 / 2$$

Sachant qu'une variable Lognormale correspond au logarithme d'une variable gaussienne, le tirage aléatoire du bruit en chaque pixel est effectué de la façon suivante :

- tirage d'une variable aléatoire gaussienne de moyenne μ_{sk} et de variance σ_{sk}^2 . Pour cela, la méthode décrite dans [WINKLER95] est utilisée :
 - tirage aléatoire de deux variables uniformes, Z_1 et Z_2 , sur $[0,1]$ jusqu'à ce que $W = Z_1^2 + Z_2^2$ soit dans le disque unité,
 - soient $N_1 = \sqrt{-2 \frac{\ln W}{W}} Z_2$ et $N_2 = \sqrt{-2 \frac{\ln W}{W}} Z_1$. N_1 et N_2 sont deux variables normales,
 - la variable retenue pour la simulation est : $N_1 \sigma_{sk} + \mu_{sk}$
- transformation par la fonction exponentielle.

Rendu de la pondération

Dans la chaîne de traitement SAR dont sont issues les images traitées, l'apodisation a été effectuée par une pondération de Hamming (cf. Chapitre 1, I.1.2.3). Pour simuler son effet – réduction des lobes secondaires autour des échos forts – le phénomène de croix sur les échos forts doit d'abord être produit. Pour cela, une image intermédiaire plus résolue est créée. Son spectre est coupé par fenêtrage de Hamming sur la bande passante voulue. Idéalement, l'image intermédiaire doit être la plus grande possible. Nous prenons une image 8 fois plus résolue. Le traitement suit alors les étapes suivantes :

- création de l'image d'amplitude non bruitée 8 fois plus grande,
- modélisation de la phase en chaque pixel par une loi uniforme sur $[0,2\pi]$,
- DFT 2D en complexes,
- pondération de Hamming (ou fenêtre carrée) avec une bande passante 8 fois plus petite,
- DFT 2D Inverse en complexes,
- calcul de l'amplitude en chaque pixel,
- ajout du bruit multiplicatif.

La figure 7 ci-dessous montre le résultat sur une vue contenant un point brillant. Avec une fenêtre carrée, on retrouve bien la croix. Avec la fenêtre de Hamming, les lobes secondaires sont réduits. La figure 8 suivante montre un exemple d'image de demi-couronne, avec fenêtrage carré et pondération de Hamming. La dernière figure (figure 9) présente une image de couronne obtenue avec pondération de Hamming, la classification ICE-MPM-GEMI en deux classes, le résultat du détecteur DF et la fusion de ces deux traitements (cf. Chapitre 2, II).

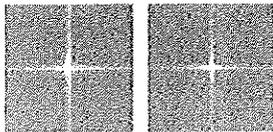


figure 7 : simulation d'un point brillant, avec fenêtre carré et de Hamming

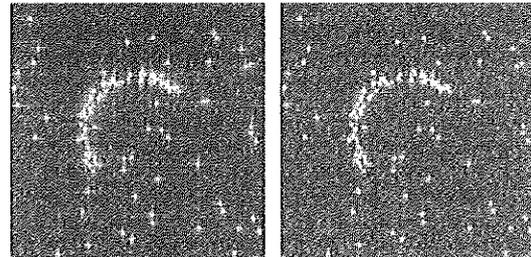


figure 8 : simulation d'une demi-couronne, avec fenêtre carrée et de Hamming

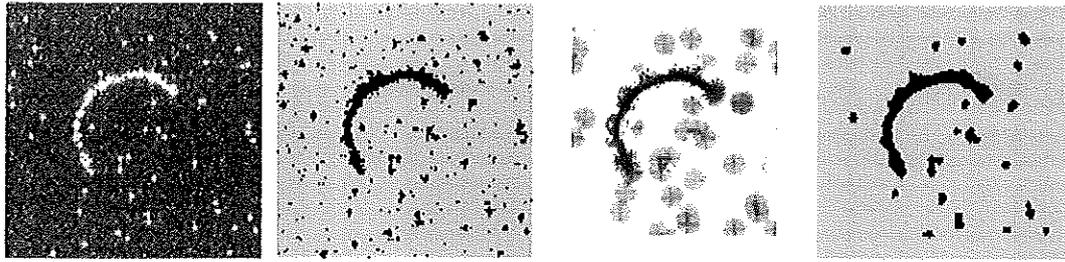


figure 9 : image simulée avec pondération de Hamming. Image, classification, DF et fusion

ANNEXE G. Illustration sur la détection de segments par TH locale

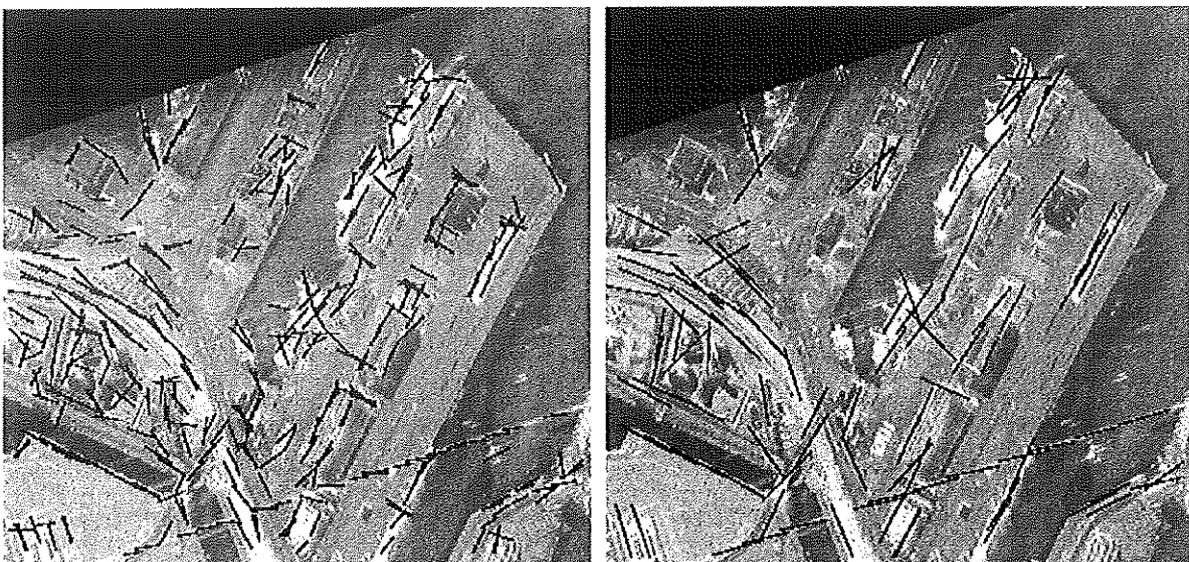
Nous avons testé un algorithme de TH locale pour voir s'il est possible de trouver grossièrement les extrémités des segments sur chaque ligne brillante. L'image est traitée localement par bloc glissant. Sur chaque bloc, l'algorithme suit le même fonctionnement que celui de la TH globale (chapitre 3, IV.2.2). Pour réduire les non-détections qui ont lieu lorsqu'une structure se situe entre deux blocs, nous optons pour le recouvrement des blocs successifs.

Au lieu de blocs, une seconde possibilité serait d'utiliser un algorithme dit de TR localisée, consistant à réaliser une accumulation globale 3-D. Les deux premières dimensions coïncident avec les coordonnées polaires définissant une droite. La troisième dimension correspond au découpage des droites en portions de même longueur. Un exemple d'application de la TR localisée se trouve dans [RODENAS99].

Trois paramètres doivent donc être fixés : le taux de recouvrement, le seuil de sélection et la taille des blocs. Le taux de recouvrement peut être élevé afin de détecter toutes les structures. Le seuil de sélection est égal à 0.7 que multiplie l'épaisseur du trait fixée à 3 pixels et la longueur minimale. Cette longueur est proportionnelle à la taille du bloc glissant, qui est donc déterminante.

Deux exemples sont présentés sur la figure ci-dessous. Le premier résultat est obtenu avec une plus petite taille de bloc que le second. Si la longueur minimale de détection est trop grande, les bâtiments alignés et proches sont réunis. Si elle est plus courte, la majorité des structures linéaires brillantes sont détectées et représentées par un ensemble de petits segments. Un post-traitement est nécessaire pour connecter des segments trouvés. De plus des fausses alarmes apparaissent sur les côtés des routes. Ces segments ne seraient pas supprimés même si on utilisait la direction privilégiée estimée par TH globale.

Nous concluons que pour utiliser la TH locale, nous sommes confrontés au choix d'un compromis entre détection fine avec post-traitement et détection grossière aboutissant à une interprétation fautive de la scène. De plus, il serait possible de supprimer des fausses alarmes en effectuant la détection de droites orthogonales.



TH locale, accumulation binaire. Longueur=20 et Longueur=5

Liste des publications

E. Simonetto, H. Oriot, R. Garello, "Extraction 3D de structures industrielles par radargrammétrie haute résolution", *Bulletin de la SFPT*, à paraître dans le n.165, 2002

E. Simonetto, H. Oriot, R. Garello, "Extraction of industrial buildings from stereoscopic airborne radar images", *8th International Symposium on Remote Sensing'01*, Toulouse, sept. 2001

E. Simonetto, H. Oriot, R. Garello, "Extraction of industrial structures and DEM from airborne SAR images", *PSIP'01*, Marseille, janv. 2001

E. Simonetto, H. Oriot, R. Garello, "Potentiality of high resolution SAR images for radargrammetric applications", *CEOS'99*, Toulouse, oct. 1999

E. Simonetto, H. Oriot, R. Garello, "3D extraction from airborne SAR imagery", *EUROPTO'99*, Florence, sept. 1999

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AFS93] C. Olmsted, Alaska SAR Facility - Scientific SAR User's Guide, <http://www.asf.edu/user8serv/ssug>, 1993
- [AYACHE85] N. Ayache, B. Faverjon, "Fast stereo matching of edge segments using prediction and verification of hypotheses", *Proceedings IEEE Comput. Soc. Conference CVPR*, San Fransisco, CA, p.662-667, 1985
- [BAILLARD97] C. Baillard, *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3-D des milieux urbains – Détection et caractérisation du sursol*, thèse de l'ENST Paris, 1997
- [BAKER81] H. Baker, T.O. Binford, "Depth from edge and intensity based stereo", *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol.2, n.4, p.333-340, 1980
- [BALLARD81] D.H. Ballard, "Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes", *Pattern Recognition*, vol.13, n.2, p.111-122, 1981
- [BARNARD80] S.T. Barnard, W.B. Thomson, "Disparity analysis of images", *IEEE Trans. on PAMI*, vol.2, p.333-340, 1980
- [BARAKAT86] R. Barakat, "Weak-scatterer generalization of the K-density function with application to laser scattering in atmospheric turbulence", *Journal Opt. Soc. Am. A* 3, p.401-409, 1986
- [BEASLEY93] D. Beasley, D.R. Bull, R.R. Martin, "An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals", *University Computing*, vol.15, n.2, p.58-69, 1993
- [BECKMAN87] P. Beckman, A. Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Artech House, 1987
- [BELGUED99] Y. Belgued, E. Hervet, C. Lemaréchal, L. Rognan, P. Marthon, F. Adragna, "An accurate radargrammetric chain for DEM generation", *CEOS'99*, Toulouse, 1999
- [BENHAMID00] S. Ben Hamida, A. Pétrowski, "The need for improving the exploration operators for constrained optimization problems", *Parallel Problem Solving from Nature PPSN'00*, Paris, France, 2000
- [BICKEL97] D.L. Bickel, W.H. Hensley, D.A. Yocky, "The effect of scattering from buildings on interferometric SAR measurements", *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, vol.4, p.1545-1547, 1997
- [BOLTER98a] R. Bolter, M. Gelautz, F. Leberl, "Simulation based SAR-stereo analysis in layover areas", *Proc. IGARSS'96*, Seattle, p.345-347, 1996
- [BOLTER98b] R. Bolter, A. Pinz, "3D exploitation of SAR images", *MAVERIC European Workshop*, Kingston, 1998
- [BOLTER00a] R. Bolter, "Reconstruction of man-made objects from high-resolution SAR images", *Proc. IEEE Aerospace Conference*, Bigsky, Montana, papier n.6.0305, 2000
- [BOLTER00b] R. Bolter, "Detection and reconstruction of human scale features from high-resolution interferometric SAR data", *Proc. ICPR*, vol.4, p.291-294, Barcelone, 2000

- [BOUCHER96] J.-M. Boucher, *Modélisation et traitement des signaux non stationnaires*, cours ENST Bretagne, 1996
- [BOUTRY98] J.M. Boutry, "Image quality parameters of a high resolution experimental SAR", *3rd NATO/IRIS Joint Symposium*, Quebec, Canada, octobre 1998
- [BRYAN82] M.L. Bryan, "Analysis of two Seasat synthetic aperture radar images of an urban scene", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.48, n.3, p.393-398, mars 1982
- [BRUZZONE92] E. Bruzone, M. Cazzanti, L. de Floriani, F. Mangili, "Applying two-dimensional Delaunay triangulation to stereo data interpolation", *ECCV'92*, Genne, 1992
- [BURKHART96] G.R. Burkhart, Z. Bergen, R. Carande, "Elevation correction and building extraction from interferometric SAR imagery", *IGARSS'96*, p.659-661, 1996
- [CARRARA95] W.G. Carrara, R.S. Goodman, R.M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar, Signal Processing Algorithms*, Artech House, 1995
- [CHEN96] P.-H. Chen, I.J. Dowman, "Space intersection from ERS-1 synthetic aperture radar images", *Photogrammetric Record*, vol.15, n.88, p.561-573, 1996
- [CHESNAUD99] C. Chesnaud, P. Réfrégier, V. Boulet, "Statistical region snake-based segmentation adapted to different physical noise model", *IEEE Trans. PAMI*, vol.21, n.11, p.1145-1157, 1999
- [COULON] F. de Coulon, *Théorie et traitement des signaux*, Traité d'Electricité, d'Electronique et d'Electrotechnique
- [CROSS98] A.D.J. Cross, E.R. Hancock, "Recognising building patterns using matched filters and genetic search", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.53, p.95-107, 1998
- [DEANS81] S.R. Deans, "Hough transform from the Radon transform", *IEEE PAMI*, n.PAMI-3, p.185-188, 1981
- [DEB98] K. Deb, "Genetic algorithm in search and optimization: the technique and applications", *Proceedings of International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems*, Calcutta, Indes, p.58-87, 1998
- [DEJOINVI01] O. de Joinville, G. Maillet, H. Maître, M. Roux, "Evaluation a priori de la qualité d'un MNS", *ORASIS*, Cahors, 2001
- [DELIGNON93] Y. Delignon, *Etude statistique d'images radar de la surface de la mer*, thèse de l'Université de Rennes-1, 1993
- [DENOS92] M. Denos, "A pyramidal scheme for stereo matching SIR-B imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol 13, n.2, p.387-392, 1992
- [DISSARD95] O. Dissard, O. Jamet, "3D-reconstruction of buildings from stereo images using both monocular analysis and stereo-matching: an assessment within the context of cartographic production", *SPIE Aerosense*, Orlando, 1995
- [DOWMAN82] J. Dowman, A.H. Morris, "The use of synthetic aperture radar for mapping", *Photogrammetric Record*, vol.10, n.60, p.687-696, octobre 1982
- [DOWMAN93] I. Dowman, C. Pu-Huai, O. Clochez, G. Saundercock, "Heighting from stereoscopic ERS-1 data", *Proc. Second ERS-1 Symposium*, p.609-614, 1993
- [DUDA72] R.O. Duda, P.E. Hart, "Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures", *Communication ACM*, vol.15, n.1, p.11-15, 1972
- [ELIZAVET00] I.V. Elizavetin, "Approach to the SAR stereo data processing based on the matching of multiangle set", *EUSAR'00*, München, 2000

- [FESSLER95] J.A. Fessler, "Moments of implicitly defined estimators (e.g. ML and MAP): applications to transmission tomography", *Proc. IEEE Conf. Acoust. Speech Sig. Proc.*, vol.4, p.2291-2294, 1995
- [FJORTOFT99] R. Fjortoft, *Segmentation d'images radar par détection de contours*, thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999
- [FORSTER97] B. Forster, C. Ticehurst, Y. Dong, "Analysis of radar response from urban areas", *IEEE*, p.891-894, 1997
- [FOUQUE02] L. Fouque, *Sur une méthodologie générale de fusion de Dempster-Shafer pour la classification markovienne d'images multirésolutions*, thèse de l'Université Paris VI, 2002
- [FROST82] V.S. Frost, J. Stiles, K. Shanmugan, J. Holtzman, "A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise", *IEEE PAMI*, vol.PAMI-4, n.2, p.157-166, mars 1982
- [FUA91] P. Fua, "Combining stereo and monocular information to compute dense depth maps that preserve discontinuities", *IJCAI Conference*, Sydney, 1991
- [FULLERTO86] J.K. Fullerton, F. Leberl, R.E. Marke, "Opposite-side SAR image processing for stereo viewing", *Photogr. Eng. and Rem. Sensing*, vol.52, n.9, p.1487-1498, 1986
- [GAMBA99] P. Gamba, B. Houshmand, "Three dimensional urban characterization by IFSAR measurements", *Proc. IGARSS'99*, Hambourg, p.2401-2403, 1999
- [GAMBA01] P. Gamba, B. Houshmand, "Integration of hyperspectral and IFSAR data for improved 3D urban profile reconstruction", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.67, n.8, p.947-956, 2001
- [GEIGER95] D. Geiger, B. Ladendorf, A. Yuille, "Occlusions and binocular stereo", *Int. Journal of Computer Vision*, n.14, p.211-226, 1995
- [GELAUTZ96] M. Gelautz, F. Weinbergmair, F. Leberl, "On the detection and exploitation of layover in Magellan SAR imagery", *IAPRS*, vol.XXXI, Part B4, Vienne, p.283-288, 1996
- [GERMAIN00] O. Germain, P. Réfrégier, "Statistical multi-region snake-based segmentation", *Conf. on Mathematical Modelling, Estimation and Imaging*, SPIE vol.4121, San Diego, août 2000
- [GIORDANA96] N. Giordana, *Segmentation non supervisée d'images multi-spectrales par chaînes de Markov cachées*, thèse de l'Université Technologique de Compiègne, 1996
- [GLOVER89] F. Glover, "Tabu search Part I", *ORSA Journal on Computing*, vol.I, n.3, p.190-206, 1989
- [GOLDBERG89] D. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, 1989
- [GOLDSTEI73] C.B. Goldstein, "False alarm regulation in log-normal and weibull clutter", *IEEE Trans. on AES*, vol.AES-9, n.1, p.84-92, 1973
- [GOODMAN75] J. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns", dans *Laser Speckle and Related Phenomena*, vol.9, J.C Dainty, Springer Verlag, Heidelberg, 1975
- [GOUINAUD96] C. Gouinaud, *Traitement d'images satellitaires pour la détection d'agglomérations*, thèse de l'ENST Paris, 1996
- [GOULERMA01] J.Y. Goulermas, P. Liatsis, "Hybrid symbiotic genetic optimisation for robust edge-based stereo correspondence", *Pattern Recognition*, n.34,p.2477-2496,2001

- [GRUEN85] A.W. Gruen, "Adaptative least squares correlation : a powerful image matching technique", *S. Afr. Journal of Photogrammetry Remote Sensing and Cartography*, vol.14, n.3, p.175-187, 1985
- [GUICHARD87] H. Guichard et al., "Stéréorestitution numérique SPOT : une approche originale de formation des images épipolaires et de mise en correspondance", *colloque SPOT1 Utilisation des images : bilan et résultats*, p.1371-1392, Paris, 1987
- [GUO99] L. Guo, O. Chutatape, "Influence of discretization in image space on Hough transform", *Pattern Recognition*, vol.32, p.635-644, 1999
- [HAN94] J.H. Han, L.T. Koczy, T. Poston, "Fuzzy Hough transform", *Pattern Recognition Letters*, n.15, p.649-658, 1994
- [HARIK99] G. Harik, F. Lobo, *A parameter-less genetic algorithm*, Rapport IlliGAL n.99009, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999
- [HERVET00] E. Hervet, *Appariement d'images radar à synthèse d'ouverture en conditions radargrammétiques*, thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000
- [HOEPFNER99] K.B. Hoepfner, *Recovery of building structure from IFSAR-derived elevation maps*, Rapport technique CMPSCI 99-16, 1999
- [HOLLAND75] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, PhD Thesis, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- [HOUGH62] P.V.C. Hough, *Method and means for recognizing complex patterns*, Rapport technique n.3069654, US Patent, 1962
- [HOUCK95] C. Houck, J.A. Joines, M.G. Kay, *A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation*, NCSU-IE rapport technique 95-09, http://www.fmmcenter.ncsu.edu/fac_staff/joines/papers/, 1995
- [HSIEH90] Y.C.H. Hsieh, F. Perlant, D.M. McKeown, "Recovering 3D information from complex aerial imagery", *IEEE*, p.136-146, 1990
- [IGN] <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie>
- [ILLINGWO88] J. Illingworth, J. Kittler, "A survey of the Hough transform", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol.44, p.87-116, 1988
- [IOANNOU99] D. Ioannou, W. Huda, A.F. Laine, "Recognition through a 2D Hough transform and radius histogramming", *Image and Vision Computing*, n.17, p.15-26, 1999
- [JACQUIS97] F. Jacquis, *Techniques de corrélation pour la radargrammétrie, filtrage et détection de structures*, thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1997
- [JAKEMAN76] E. Jakeman, P.N. Pusey, "A model for non Rayleigh sea echo", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.AP-24, n.6, p.806-814, 1976
- [JAO84] J.K. Jao, "Amplitude of composite terrain radar clutter and the K distribution", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.AP-32, n.10, p.1049-1062, 1984
- [JOHNSON70a] N.L. Johnson, S. Kotz, *Continuous univariate distributions-1*, John Wiley & Sons, 1970
- [JOHNSON70b] N.L. Johnson, S. Kotz, *Continuous univariate distributions-2*, Houghton Mifflin Company, 1970
- [JORDAN92] M. Jordan, *Analyse stéréoscopique de vues aériennes. Elaboration d'une description volumique des scènes*, thèse de l'Université de Paris-Sud, Orsay, 1992

- [KALVIAIN94] H. Kälviäinen, P. Hirvonen, "Connective Randomized Hough Transform (CRHT)", *Proc. 9th Scandinavian Conf. On Image Analysis*, Uppsala, Suède, p.1029-1036, 1995
- [KALVIAIN95] H. Kälviäinen, P. Hirvonen, L. Xu, E. Oja, "Comparisons of probabilistic and non-probabilistic Hough transforms", *Proc. 3rd European Conf. On Computer Vision*, Stockholm, Suède, p.351-360, 1994
- [KIERKEGA92] P. Kierkegaard, "A method for detection of circular arcs based on the Hough transform", *Machine Vision and Applications*, vol.5, p.249-263, 1992
- [KIRKPATR83] S. Kirkpatrick, C.D. Gellatt, M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol.220, n.4598, p.671-680, 1983
- [KIRSCHT98] M. Kirscht, C. Rinke, "3D reconstruction of buildings and vegetation from SAR images", *IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, Japon, p.228-231, 1998
- [KOBRIK86] M. Kobrick, F. Leberl, J. Raggam, "Radar stereo mapping with crossing flight lines", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol.12, n.2, p.132-148, 1992
- [KUAN85] D.T. Kuan et al., "Adaptative noise smoothing filter for images with signal dependant noise", *IEEE PAMI*, vol.7, n.2, p.165-177, 1985
- [KUAN87] D.T. Kuan et al., "Adaptative restauration of images with speckle", *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol.ASSP-35, n.3, p.373-383, 1987
- [KUTTIKKA96] S. Kuttikkad, R. Chellappa, L. Novak, "Building 2-D wide area site models from single- and multi-pass single polarization SAR data", *SPIE Aerosense'96*, Orlando, 1996
- [KYRIATI91] N. Kiryati, A.M. Bruckstein, "Antialiasing the Hough transform", *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol.53, n.3, p.213-222, 1991
- [LAPRADE63] La Prade, "An analytical and experimental study of stereo for radar", *Photogrammetry Engineering*, vol.29, p.294-300, 1963
- [LAPRADE69] La Prade, "Elevations from radar imagery", *Photogrammetry Engineering*, vol.35, p.366-371, 1969
- [LAUR89] H. Laur, *Analyse d'images radar en télédétection: discriminateurs radiométriques et texturaux*, thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989
- [LEAVERS92] V.F. Leavers, "Survey: Which Hough Transform", *CVGIP: Image Understanding*, vol.58, n.2, p.250-264, 1993
- [LEBERL79] F.W. Leberl, "Accuracy analysis of stereo side-looking radar", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.45, n.8, p.1083-1096, 1979
- [LEBERL85] F.W. Leberl, J. Raggam, M. Kobrick, "On stereo viewing of SAR images", *IEEE Trans. on GRS*, vol.GE-23, n.2, p.110-117, 1985
- [LEBERL90] F.W. Leberl, *Radargrammetric image processing*, Artech House, 1990
- [LEBERL92] F.W. Leberl, K.E. Maurice, J.K. Thomas, "Images and topographic relief at north pole of Venus", *J. of Geophysical Research*, vol.97, n.E8, p.13667-13674, 1992
- [LEBERL94] F.W. Leberl, K.E. Maurice, J.K. Thomas, M. Millot, "Automated radar image matching experiment", *ISPRS J. of Ph. And Rem. Sens.*, vol.49, n.3, p.19-33, 1994
- [LEE81] J.S. Lee, "Refined filtering of image noise using local statistics", *Computer Graphics and Image Processing*, n.15, p.380-389, 1981
- [LEE90] H-J. Lee, W-L. Lei, "Region matching and depth finding for 3D objects in stereo aerial photographs", *Pattern Recognition*, vol.23, n.1, p.81-94, 1990

- [LERMAN95] I.C. Lerman, R.F. Ngouenet, *Algorithmes génétiques séquentiels et parallèles pour une représentation affine des proximités*, Rapport de recherche n. 2570, INRIA, 1995
- [LEWINSKI83] D.J. Lewinski, "Non stationary probabilistic target and clutter scattering models", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.AP-31, n.3, p.490-498, 1983
- [LI85] H. Li, M.A. Lavin, R.J. Lemaster, "Fast Hough Transform", *WCVRC*, p.75-83, 1985
- [LIANG90] P. Liang, "A new transform for curve detection", *IEEE*, p.748-751, 1990
- [LOPES90a] A. Lopès, R. Touzi, E. Nezry, "Adaptative speckle filters and scene heterogeneity", *IEEE GRS*, vol.28, n.6, p.992-1000, 1990
- [LOPES90b] A. Lopès, H. Laur, E. Nezry, "Statistical distribution and texture in multilook and complex SAR images", *IGARSS'90*, Washington, p.2427-2430, 1990
- [LOTTI96] J-L. Lotti, *Mise en correspondance stéréo par fenêtres adaptatives en imagerie aérienne haute résolution*, thèse de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, 1996
- [LUO90] W. Luo, H. Maître, "Using surface model to correct and fit disparity data in stereo vision", *IEEE 10th International Conference on Pattern Recognition*, Atlantic City, New Jersey, vol.1, p.60-64, 1990
- [LUTTON93] E. Lutton, P. Martinez, *A genetic algorithm for the detection of 2D geometric primitives in images*, rapport de recherche INRIA, n.2110, 1993
- [MASSONNE93] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fegi, T. Rabaute, "The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature*, vol.364, p.138-142, 1993
- [MA93] R. Ma, M. Thonnat, *A robust and efficient stereo matching algorithm*, Rapport de Recherche de l'INRIA, n.1860, 1993
- [MERCER98] J.B. Mercer, "Radar-derived DEMs for urban areas", *Symposium ISPRS Commission IV*, Stuttgart, 1998
- [NICOLAS00] J.M. Nicolas, A. Maruani, R. Badeau, "Les moments d'ordre inférieur : Principes et application au filtrage des images RSO", *RFIA '00*, Paris, vol.III, p.27-36, 2000
- [NOCERA96] L. Nocera, *Reconstruction du relief en imagerie radar à ouverture de synthèse : stéréoscopie et ombrages*, thèse de l'Université Paris VII Jussieu, 1996
- [OHTA87] Y. Ohta, K. Takano, K. Ikeda, "A highspeed stereo matching system based on dynamic programming", *IEEE ICCV*, Londres, p.335-342, 1987
- [OKUTOMI92] M. Okutomi, T. Kanade, "A locally adaptive window for signal matching", *International Journal of Computer Vision*, vol.7, n.2, p.143-162, 1992
- [OLIVER98] C. Oliver, S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, Artech House, 1998
- [OLLER01] G. Oller, L. Denise, P. Marthon, L. Rognant, "SAR images matching improvement in radargrammetric conditions", *Remote Sensing'01*, Toulouse, 2001
- [ORIoT98a] H. Oriot, G. Le Besnerais, "Matching aerial stereo images using graduated non convexity techniques", *Congrès ISPRS*, Columbus, 1998
- [ORIoT98b] H. Oriot, A. Michel, O. Goretta, "Extraction of rectangular roofs on stereoscopic images. An interactive approach", *Congrès ISPRS*, Columbus, 1998

- [OTTO89] G.T. Otto, T.K.W. Chau, "Region-growing algorithm for matching of terrain images", *Image and Vision Computing*, vol.7, n.2, p.83-94, 1989
- [PETIT00] D. Petit, Cours DESS Université Paul Sabatier, Toulouse, Ingénierie de l'image numérique, http://www.irit.fr/ACTIVITES/DESS_IIN/cours/radar
- [PETIT01a] D. Petit, L. Soucille, J-D. Durou, F. Adragna, "Spatial phase behaviour in SAR images", *Remote Sensing'01*, Toulouse, 2001
- [PETIT01b] D. Petit, J-D. Durou, F. Adragna, "Détection automatique des repliements en interférométrie radar par analyse de "cohérences de pente" multi-décalages", *ORASIS'01*, Cahors, 2001
- [POLIDORI97] L. Polidori, *Cartographie radar*, Gordon & Breach Science Publishers, 1997
- [PONG89] T.-C. Pong, R.M. Haralick, L.G. Shapiro, "Matching topographic structures in stereo vision", *Pattern Recognition Letters*, n.9, p.127-136, 1989
- [POTTIER00] E. Pottier, J.S. Lee, "Unsupervised classification scheme of POLSAR images based on the complex Wishart distribution and the "H/A/ α " polarimetric decomposition theorem", *EUSAR'00*, Munich, p.265-268, 2000
- [QUARTULL01] M. Quartulli, M. Datcu, "A bayesian inversion method for the 3-D reconstruction of settlements from metric SAR observations", *Remote Sensing'01*, Toulouse, 2001
- [RADAR01] F. Adragna, J.M. Le Caillec, D. Ducrot, R. Garello, S. Le Hégarat-Masclé, A. Lopès, H. Maître, J.M. Nicolas, E. Trouvé, F. Tupin, *Traitement des images radar à synthèse d'ouverture*, Editions Hermès Science, 2001
- [RADON17] J. Radon, "Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten", *Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Math-Phys Kl.*, vol.69, p.262-267, 1917
- [RAGGAM98] H. Raggam, K. Gutjahr, "DEM generation using RADARSAT stereo data", *ADRO'98*, Montréal, 1998
- [RAMAPRYI86] H.K. Ramapriyan, J.P. Strong, Y. Hung, C.W. Murray Jr., "Automated matching of pairs of SIR-B images for elevation mapping", *IEEE Trans. on GRS*, vol.GE-24, n.4, p.462-472, 1986
- [REFREGIE97] P. Réfrégier, O. Germain, T. Gaidon, "Optimal snake segmentation of target and background with independent Gamma density probabilities, application to speckled and preprocessed images", *Optics Communications*, vol.137, p.382-388, 1997
- [RODENAS99] J. Rodenas, *Détection et caractérisation des signatures d'ondes internes de la surface des océans dans les images ROS – Utilisation des méthodes d'analyse en ondelettes*, thèse de l'Université de Rennes-1, 1999
- [ROSENBER01] C. Rosenberger, "Fusion génétique de résultats de segmentation", *GRETSI'01*, Vannes, 2001
- [ROSENFIE68] G.H. Rosenfield, "Stereo radar technique", *Photogrammetry Engineering*, vol.34, p.586-594, 1968
- [SAITO95] H. Saito, M. Mori, "Application of genetic algorithms to stereo matching of images", *Pattern Recognition Letters*, n.16, p.815-821, 1995
- [SAPORTA90] G. Saporta, *Probabilités, analyse des données et statistique*, Editions Technip, p.141, 1990

- [SIJBERS98] J. Sijbers, *Signal and noise estimation from magnetic resonance images*, thèse de l'Université Antwerpen, 1998, <http://www.rura.ua.ac.be/visielab/theses/sijbers/>
- [SORGEL00] U. Sörgel, K. Schulz, U. Thönnessen, U. Stilla, "3D-visualization of interferometric SAR data", *EUSAR'00*, Munich, p.305-308, 2000
- [STOYLE98] P.N.R. Stoye, "Point scatterers in radar imaging", *SPIE Conference on Radar Processing, Technology and Application III*, San Diego, p.14-23, 1998
- [SYLVANDE98a] S. Sylvander, B. Petitcolas, D. Cousson, J-C. Souyris, "Evaluation of the potential of RADARSAT images for the production of digital terrain model by radargrammetry", *ADRO'98*, Montreal, 1998
- [SYLVANDE98b] S. Sylvander, P. Gigord, P. Durand, "Evaluation of the geometric potential of RADARSAT images", *ADRO'98* Montreal, 1998
- [TARAYRE96] H. Tarayre, *Extraction de modèles numériques de terrain par interférométrie radar satellitaire : algorithmie et artefacts atmosphériques*, thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996
- [THOMAS86] J.K. Thomas, V.H. Kaupp, W.P. Waite, H.C. MacDonald, "Computer-derived height from SIR-B stereo radar images", *Proc. of IGARSS'86*, Zurich, p.639-643, 1986
- [THOMAS87] J.K. Thomas, V.H. Kaupp, W.P. Waite, H.C. MacDonald, "Considerations for optimum radar stereo", *Proc. of IGARSS'87*, Ann Arbor, p.1531-1536, 1987
- [TOET95] A. Toet, W.P. Hajema, "Genetic contour matching", *Pattern Recognition Letters*, n.16, p.849-856, 1995
- [TOUTIN97] T. Toutin, "Evaluation de la géométrie des images RADARSAT : premiers résultats", *GER'97*, Ottawa, Canada, mai 1997
- [TOUTIN00] T. Toutin, L. Gray, "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data", *ISPRS JPRS*, n.55, p.13-33, 2000
- [TOUZI88] R. Touzi, A. Lopès, P. Bousquet, "A statistical and geometrical edge detector for SAR images", *IEEE Trans. on GRS*, vol.26, n.6, p.764-773, 1988
- [TRUNK70] G.V. Trunk, S.F. George, "Detection of targets in non-gaussian sea-clutter", *IEEE Trans. on AES*, vol.AES-6, n.5, p.620-628, 1970
- [TUPIN97] F. Tupin, *Reconnaissance des formes et analyse de scène en imagerie de radar à ouverture synthétique*, thèse de l'ENST Paris, 1997
- [TUPIN01] F. Tupin, "Développement d'une approche figurale pour la radargrammétrie", à paraître dans le *Bulletin SFPT*, n.165, 2001
- [TWU96] Z-G. Twu, I.J. Dowman, "Automatic Height extraction from ERS-1 SAR imagery", *IAPRS*, vol XXXI, part B2, Vienne, Autriche, p.380-383, 1996
- [VANVEEN81] T.M. Van Veen, F.C.A. Groen, "Discretization errors in the Hough transform", *Pattern Recognition*, vol.14, p.137-145, 1981
- [WINKLER95] G. Winkler, *Image analysis, random fields and dynamic Monte Carlo methods – A mathematical introduction*, Applications of Mathematics 27, Springer, p.297, 1995
- [XIA97] Z-G. Xia, F.M. Henderson, "Understanding the relationships between radar response patterns and the bio- and geophysical parameters of urban areas", *IEEE Trans. on GRS*, vol.35, n.1, p.93-101, 1997
- [XU90] L. Xu, E. Oja, P. Kultanen, "A new curve detection method: Randomized Hough Transform (RHT) ", *Pattern Recognition Letters*, n.11, p.331-338, 1990

-
- [YUEN90] H.K. Yuen, J. Princen, J. Illingworth, J. Kittler, "Comparative study of Hough transform methods for circle finding", *Image and Vision Computing*, vol.8, n.1, p.71-77, 1990
- [YUEN91] H.K. Yuen, "Connective Hough transform", *Proc. British Machine Vision Conference*, Glasgow, 1991
- [ZEBKER94] H.A. Zebker, P.A. Rosen, R.M. Goldstein, C. Werner, A. Gabriel, "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry", *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, vol.99, n.10, p.19617-19634, 1994