



HAL
open science

Reconstruction 3D pour la volcanologie: apports d'une méthode multi-vues par photogrammétrie numérique

Emmanuelle Cecchi

► **To cite this version:**

Emmanuelle Cecchi. Reconstruction 3D pour la volcanologie: apports d'une méthode multi-vues par photogrammétrie numérique. Géologie appliquée. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2003. Français. NNT: . tel-00007483

HAL Id: tel-00007483

<https://theses.hal.science/tel-00007483>

Submitted on 22 Nov 2004

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 1466 402
ED SCIENCES FONDAMENTALES

ANNEE **2003**

THESE PRESENTEE PAR

Emmanuelle CECCHI

POUR OBTENIR LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT-FERRAND II - UFR DE
RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

SPECIALITE **VOLCANOLOGIE**

DATE DE SOUTENANCE : DECEMBRE 2003

RECONSTRUCTION 3D POUR LA VOLCANOLOGIE :

APPORTS D'UNE METHODE MULTI-VUES PAR

PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE

JURY

BENJAMIN VAN WYK DE VRIES

JEAN-MARC LAVEST

GEORGES BOUDON

JAN OLOF EKLUNDH

KARIM KELFOUN

MIKE JAMES

JEAN-PAUL GERMAIN

DIRECTEUR DE THESE

DIRECTEUR DE THESE

RAPPORTEUR

RAPPORTEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR - INVITE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout particulièrement à remercier Jean-Marc Lavest et Benjamin van Wyk de Vries, mes deux directeurs de thèse, pour leur soutien, leur disponibilité, et leur confiance tout au long de ces trois années de thèse. Merci sincèrement à tous les deux.

Je remercie également toutes les personnes qui se sont intéressées et qui ont collaboré à ce projet, qui se sont impliquées et m'ont encouragé dans mes travaux :

Philippe Labazuy
Mélanie Morel
Céline Larreche
Jean-François Oehler
Sébastien Cornou
Karim Kelfoun
Jean-François Lénat
Frédéric Jurie
Michel Dhome
Jean-Thierry Lapresté

Et beaucoup d'autres...

Je salue aussi la direction et toute l'équipe du LASMEA qui m'a accueilli durant la majeure partie de ma thèse, et dont le dynamisme et la bonne humeur ont participé à créer une ambiance de travail particulièrement agréable

Je n'oublie pas non plus le Laboratoire Magmas et Volcans, son personnel administratif, technique, ses chercheurs et doctorants, à qui je fais un clin d'œil tout spécial, qui ont été présent pour moi.

Merci également au laboratoire des Sciences de la Terre de Lyon qui m'a à son tour accueilli chaleureusement en fin de thèse, et à toutes les personnes qui m'ont entouré.

Enfin, MERCI très fort à mes amis, à ma famille et à Jean-Philippe.

RÉSUMÉ - ABSTRACT

RÉSUMÉ

La reconstruction 3D est un outil primordial en volcanologie : études morpho-structurales, déformation du sol, modélisation analogique. Une approche originale de reconstruction 3D spécifique aux applications volcanologiques a été développée. Basée sur l'utilisation de plusieurs images numériques acquises autour d'une surface, elle se décompose en deux étapes : (1) un calibrage précis du capteur optique (2) une reconstruction 3D reposant sur la déformation itérative d'un modèle 3D initial. La méthode a été développée et testée en laboratoire sur divers modèles analogiques. Les résultats montrent qu'elle constitue un outil de quantification souple et puissant permettant de détecter des variations fines de la morphologie. Des tests sur site réel ont aussi montré le potentiel important de la méthode dans le cadre de la surveillance volcanologique. L'approche, à la frontière entre Volcanologie et Vision par Ordinateur, offre une alternative aux méthodes classiquement utilisées.

ABSTRACT

3-D reconstruction is a basic tool for volcanology providing data for morpho-structural studies, ground deformation monitoring and analogue simulations. An original reconstruction approach has been developed to suit the specific requirements of volcanology. Based on the use of multiple digital images acquired around a surface, the approach takes two main stages: (1) a precise calibration of the optical sensor (2) a 3-D reconstruction process using an iterative deformation of an initial 3-D model. The method was developed and tested in laboratory on a variety of analogue experiments. The results show that the method is a versatile and powerful reconstruction method allowing the detection of fine morphological variations. Tests on real volcanic surfaces have also shown the method's potential to provide data for volcanic monitoring. The approach, which lies at on the boundary between volcanology and Computer Vision, offers a refinement and alternative to classical photogrammetric methods.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ - ABSTRACT	5
TABLE DES MATIÈRES	7
INTRODUCTION	11
1 RECONSTRUCTION 3-D : CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES	15
1.1 RECONSTRUCTION 3-D DE SURFACES EN VOLCANOLOGIE	15
1.1.1 LES MÉTHODES ACTUELLES DE RÉALISATION DE MNT	15
1.1.2 UNE NOUVELLE APPROCHE PROPOSÉE	19
1.2 ÉLÉMENTS GÉOMÉTRIQUES POUR LA RECONSTRUCTION 3D	22
1.2.1 STÉRÉO VISION : PERCEPTION DE L'ESPACE TRIDIMENSIONNEL	22
1.2.2 DE LA RECONSTRUCTION PROJECTIVE À LA RECONSTRUCTION EUCLIDIENNE	24
1.2.2.1 L'ESPACE PROJECTIF.	25
1.2.2.2 DE LA GÉOMÉTRIE PROJECTIVE À LA GÉOMÉTRIE EUCLIDIENNE	27
1.2.3 GÉOMÉTRIE ÉPIPOLAIRE	29
1.2.4 GÉOMÉTRIE MULTI-VUES	32
1.3 RECONSTRUCTION 3-D MULTI-VUES EN VISION PAR ORDINATEUR	35
1.3.1 INTRODUCTION	35
1.3.2 POURQUOI L'UTILISATION DE PLUSIEURS VUES POUR LA RECONSTRUCTION 3D ?	36
1.3.3 LES DIFFÉRENTES APPROCHES POSSIBLES	36

1.3.3.1	RECONSTRUCTION STÉRÉO DENSE	37
1.3.3.2	STRUCTURE À PARTIR DU MOUVEMENT (STRUCTURE FROM MOTION)	39
1.3.3.3	DÉFORMATION DE MODÈLES DE SURFACE 3D	40
1.3.3.4	APPROCHES VOLUMIQUES	42
1.3.3.5	MÉTHODES INTERACTIVES	45
1.3.4	PROBLÈMES MAJEURS SOULEVÉS	46
1.4	POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX	49
2	UNE « NOUVELLE » APPROCHE DE RECONSTRUCTION MULTI-VUES EN VOLCANOLOGIE	52
2.1	DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE EN LABORATOIRE	52
2.1.1	UN OUTIL D'ANALYSE ET DE QUANTIFICATION	52
2.1.2	CONDITIONS DE LABORATOIRE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	54
2.1.3	PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE	56
2.2	ÉTALONNAGE DU CAPTEUR ET GÉOMÉTRIE EXTRINSÈQUE	59
2.2.1	CALIBRAGE D'UN CAPTEUR	59
2.2.1.1	FORMULATION DU PROBLÈME DE CALIBRAGE	59
2.2.1.1.1	MODÈLE DE CAMÉRA ET TYPE DE PROJECTION	60
2.2.1.1.2	LES CHANGEMENTS DE REPÈRES : DU REPÈRE OBJET AU REPÈRE IMAGE	61
2.2.1.2	LES DIFFÉRENTES APPROCHES POSSIBLES	64
2.2.1.2.1	LES MÉTHODES LINÉAIRES	64
2.2.1.2.2	LES MÉTHODES NON LINÉAIRES	65
2.2.1.2.3	LES MÉTHODES D'AUTOCALIBRAGE	66
2.2.2	MÉTHODE DE CALIBRAGE CHOISIE	67
2.2.2.1	MODÈLE MATHÉMATIQUE UTILISÉ	67
2.2.2.2	RÉSOLUTION DU PROBLÈME	70
2.2.2.2.1	GÉNÉRALITÉS SUR L'ESTIMATION PARAMÉTRIQUE	70
2.2.2.2.2	LE CRITÈRE CHOISI	71
2.2.2.3	MISE EN ŒUVRE	72
2.2.3	TYPE DE CAPTEUR UTILISÉ	74
2.3	L'ÉTAPE DE RECONSTRUCTION 3D	75
2.3.1	HYPOTHÈSES INITIALES	75
2.3.2	MODÈLE 3D INITIAL	76
2.3.3	L'OPTIMISATION DU MODÈLE	79
2.3.3.1	LE VECTEUR D'INCONNUES	79
2.3.3.2	CRITÈRE ET MÉTHODE D'OPTIMISATION	80
2.3.3.3	MISE EN CORRESPONDANCE : SÉLECTION DES IMAGES ET ÉCHANTILLONNAGE DES FACETTES	84
2.3.3.3.1	CHOIX DES FACETTES ET DES IMAGES POUR L'OPTIMISATION	84

2.3.3.3.2	ÉCHANTILLONNAGE DES FACETTES	86
2.3.3.4	UN CRITÈRE SECONDAIRE	88
2.3.3.5	ÉLIMINATION DES MESURES PERTURBANTES	89
2.4	EXEMPLE DE RECONSTRUCTION : CÔNES STATIQUES	90
2.5	MESURES DE PRÉCISION	92
3	TRAVAUX DE RECONSTRUCTION EN	
LABORATOIRE		94
3.1	LES MODÈLES ANALOGIQUES ÉTUDIÉS	94
3.1.1	INTRODUCTION	94
3.1.2	LES EXPÉRIENCES	94
3.1.3	SUIVI DE LA DÉFORMATION	95
3.2	DÉFORMATION GRAVITAIRE DES VOLCANS AU « CŒUR »	
	ALTÉRÉ	97
3.3	ÉTALEMENT GRAVITAIRE D'UN VOLCAN (VOLCANO SPREADING)	132
3.3.1	PHÉNOMÈNES D'ÉTALEMENT ET DE SUBSIDENCE DES ÉDIFICES VOLCANIQUES (SPREADING ET SAGGING)	132
3.3.2	UN CAS PARTICULIER D'ÉTALEMENT	142
3.4	DÉFORMATION D'UN ÉDIFICE EN RÉGIME EXTENSIF SIMPLE	147
3.5	BILAN DES RECONSTRUCTIONS EN LABORATOIRE ET	
	PERSPECTIVES.	154
3.5.1	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	154
3.5.2	LE CAPTEUR UTILISÉ	156
3.5.3	CONFIGURATION DES VUES	157
3.5.4	SUIVI DE LA DÉFORMATION	158
3.5.5	CONCLUSIONS	159
4	APPLICATION AUX SURFACES VOLCANIQUES	
RÉELLES		162
4.1	INTRODUCTION	162
4.2	APPLICATION AU TERRAIN : POTENTIEL DE LA TECHNIQUE	163
4.3	RECONSTRUCTION DU PITON DE LA FOURNAISE	185
4.3.1	LE PITON DE LA FOURNAISE : PRÉSENTATION	185
4.3.2	CHOIX DU SITE ET OBJECTIFS DE LA MISSION	187
4.3.2.1	CHOIX DU SITE	187

4.3.2.2	OBJECTIFS DE LA MISSION	188
4.3.3	DONNÉES ACQUISES	191
4.3.4	RÉSULTATS	195
4.3.4.1	CALIBRAGE DU CAPTEUR	195
4.3.4.2	RÉSULTATS DE RECONSTRUCTION 3D	197
4.3.5	PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DE LA RECONSTRUCTION	205
4.4	BILAN	209
	CONCLUSION	213
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	217

INTRODUCTION

L'analyse morphologique et structurale d'un volcan constitue l'une des bases de la volcanologie. Parce que l'histoire d'un volcan est souvent complexe, marquée par des événements divers de construction et de destruction laissant des traces, l'étude de sa morphologie constitue une première approche riche en renseignements. Ainsi, l'analyse morpho-structurale d'un édifice nous renseigne sur son histoire, son état et son type d'activité volcanique, son état de stabilité mécanique (risques d'effondrements), mais elle permet également l'étude plus générale des phénomènes responsables de sa morphologie et de ses structures, tels que les phénomènes tectoniques, gravitaires, ou d'érosion.

La reconstruction tridimensionnelle (3D) d'un édifice volcanique facilite considérablement ce type d'approche. Le résultat d'une reconstruction 3D, communément appelé Modèle Numérique de Terrain (MNT), constitue actuellement l'un des supports privilégiés, avec les observations et mesures de terrain, des études morphologiques et structurales. Il est également largement utilisé dans le cadre des études de déformation du sol, études d'une importance capitale en surveillance volcanologique. En volcanologie, la reconstruction 3D est intéressante à différentes échelles. Les MNT régionaux (plusieurs dizaines de km²) contribuent non seulement aux études structurales, mais sont aussi utilisés en interférométrie radar (mesures de déformation du sol), et servent à l'établissement de cartes de risques. A une échelle plus locale, la réalisation de MNT de haute résolution autorise l'étude morpho-structurale fine de figures de type dômes de lave, cônes éruptifs ou cratères, une localisation précise des coulées de lave et des calculs de volume. En effet, grâce à la réalisation de MNT successifs d'un même édifice, il est possible de suivre l'évolution de la topographie. Ainsi peut-on, par exemple, estimer des volumes de lave mis en place lors d'une éruption, estimer des variations de volume d'un dôme ou encore estimer des volumes de produits impliqués dans un effondrement (Kerle, 2002, Villeneuve, 2000). La représentation en 3D du relief, permise par les MNT, est en outre une représentation visuelle puissante, particulièrement convaincante lorsqu'il s'agit de communiquer et propager des informations dans le cadre de campagnes de prévention des risques volcaniques par exemple. Enfin, une telle représentation du relief et la localisation possible de données diverses aident à l'interprétation de ces données, comme c'est le cas pour certaines études géophysiques, et ce quelle que soit l'échelle de l'étude.

La reconstruction 3D, utilisée depuis des années en volcanologie, s'est plus récemment développée en volcanologie expérimentale. Elle permet, dans le cadre de la modélisation analogique en

laboratoire, une analyse qualitative plus précise comparativement aux observations visuelles classiques, et fournit des perspectives de quantification intéressantes.

La reconstruction 3D est donc très présente en volcanologie, et ses usages sont multiples. Diverses techniques de reconstruction existent, cependant, les méthodes généralement employées ne répondent pas toujours exactement aux diverses contraintes du contexte volcanique et aux exigences du volcanologue. Ces contraintes et exigences concernent notamment la souplesse d'utilisation des méthodes de reconstruction dans un cadre d'application donné, leur capacité à traiter des surfaces volcaniques, la précision des résultats et la densité de l'information souhaitée, leur coût d'application. Parallèlement, des travaux récents dans le domaine de la Vision par Ordinateur ont montré la possibilité d'utiliser de nouveaux outils de reconstruction en volcanologie. Par conséquent, face aux besoins particuliers et importants de reconstruction 3D en volcanologie, et conscients des possibilités offertes par les avancées scientifiques en Vision par Ordinateur, nous avons développé une approche originale de reconstruction 3D spécifique aux applications volcanologiques. Cette approche exploite l'expertise du monde de la Vision par Ordinateur pour répondre à la problématique soulevée en volcanologie.

La méthode proposée correspond à une approche de photogrammétrie numérique, c'est-à-dire de mesure d'un objet ou d'une scène (espace naturel) à partir d'images photographiques numériques. Elle repose sur deux phases principales : la première consiste à calibrer le capteur optique de manière très précise. Une technique de calibrage multi-vues (Lavest et al., 1998) a été choisie et intégrée à l'approche globale de reconstruction. La deuxième étape correspond au processus de reconstruction 3D de l'objet sensu stricto, qui utilise simultanément, comme pour la méthode de calibrage, plusieurs vues acquises autour de l'objet. Dans le contexte d'application visé, l'originalité de la méthode, comparativement aux techniques classiquement utilisées, réside dans cette utilisation simultanée de N vues capturées autour de la surface à reconstruire, dans l'utilisation d'un modèle 3D initial pour la reconstruction, et dans la méthode de calibrage multi-vues du capteur.

Le développement de la méthode est effectué en laboratoire, sur des modèles analogiques simples. La reconstruction 3D de modèles analogiques constitue d'ailleurs l'objectif principal de cette thèse. Une fois développée, la méthode est donc testée et affinée sur plusieurs types de modélisation analogique menées actuellement par diverses équipes de recherche. Parmi les modélisations exposées, l'une d'elle, faisant référence à nos propres travaux, est présentée en détail : il s'agit de la déformation gravitaire des édifices volcaniques au « cœur » altéré, c'est-à-dire des édifices se déformant en raison d'une faiblesse interne provoquée par l'activité du système hydrothermal. Un second objectif de cette thèse est l'application de la méthode aux surfaces volcaniques réelles. Ainsi, quelques tests de reconstruction sur site réel ont été menés parallèlement au développement et aux applications en laboratoire de la méthode.

C'est selon cette trame que s'articule le mémoire : une introduction générale sur la reconstruction 3D est d'abord nécessaire. Elle permet à la fois de situer nos travaux parmi les méthodes existantes de reconstruction 3D en volcanologie et en Vision par Ordinateur, et donne également quelques éléments mathématiques rudimentaires nécessaires à la compréhension du processus de reconstruction 3D. L'approche de reconstruction 3D multi-vues est ensuite présentée en détail. Une troisième partie traite des travaux de reconstruction en laboratoire, visant à tester cette méthode. Enfin, la dernière partie du mémoire est dédiée à l'application de la technique aux surfaces volcaniques réelles.

1 RECONSTRUCTION 3-D : CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

1.1 RECONSTRUCTION 3-D DE SURFACES EN VOLCANOLOGIE

1.1.1 LES MÉTHODES ACTUELLES DE RÉALISATION DE MNT

Les Modèles Numériques de Terrain (DTM, Digital Terrain Model ou DEM, Digital Elevation Model en anglais, ce dernier faisant référence à une grille régulière de points) sont actuellement largement utilisés en volcanologie. Les MNT sont des supports d'étude extrêmement intéressants, également employés récemment dans le cadre de la volcanologie expérimentale en laboratoire (Donnadieu et al., 2003). Dans ce dernier cas, il serait plus correct de faire référence aux termes plus généraux de MNS ou MNE, respectivement Modèles Numériques de Surface ou d'Élévation, termes généralement employés pour des reconstruction 3D de scènes urbaines. Cependant, pour des raisons de clarté, nous emploierons le terme unique de MNT pour les reconstructions en laboratoire et sur le terrain.

La réalisation d'un MNT peut s'effectuer de différentes manières. On peut distinguer les méthodes de mesures directes et indirectes. Ces dernières sont les plus couramment utilisées et permettent de fournir une information dense car basées sur l'analyse d'images. Parmi les méthodes les plus classiques, on peut citer la numérisation de cartes topographiques, l'interférométrie radar et la stéréophotogrammétrie. Les méthodes de mesures directes reposent sur des mesures ponctuelles et nécessitent en général une interpolation des données afin d'obtenir une information de surface dense, bien que certains systèmes de mesure permettent une densité de mesure très importante (exemple de la télémétrie laser aéroportée). Les mesures GPS (Global Positioning System) de points au sol ou les techniques basées sur des mesures de distance par télémétrie laser sont des exemples de ce type de données.

Voici un peu plus en détail les méthodes de mesures indirectes généralement employées :

- La digitalisation de cartes topographiques est la méthode la moins coûteuse, mais le travail est fastidieux (pointage numérique de points le long des courbes de niveaux), et ne permet pas de fournir un MNT précis (digitalisation manuelle, échelles souvent importantes, précision des données de terrain) et facile à réactualiser. Il faut noter que la photogrammétrie, dont nous allons parler plus loin, est aujourd'hui la technique principale de réalisation de cartes topographiques. La numérisation de cartes créées de cette manière permet alors simplement d'utiliser l'information topographique sous forme numérique sans exigence particulière de précision. Ce n'est pas à proprement parler une méthode de génération de MNT.
- L'imagerie radar (à ouverture de synthèse, RSO ou SAR en anglais) peut également fournir des informations 3D et permettre la réalisation de MNT précis. Elle contribue le plus souvent à l'amélioration de MNT déjà existants grâce à des techniques d'interférométrie par exemple (Hanssen, 2001), en raison de difficultés propres à l'imagerie radar (distorsions particulières) et au problème de géoréférencement des images (images radar non référencées). Cependant, il s'agit d'un processus long et délicat basé sur l'interprétation d'un signal électromagnétique complexe. Un interférogramme est réalisé à partir de deux images radar d'une même scène capturées selon deux orbites proches. Il se base sur la différence de phase associée à ces deux images (décalage dans le temps de deux ondes de même longueur), la phase correspondant au décalage dans le temps entre l'onde de référence générée par le radar et l'onde rétrodiffusée. La différence de phase entre les deux parcours contient l'information sur l'altitude du point. Le calcul d'un MNT exploite alors ce déphasage, en partie lié à la différence de position du radar entre deux acquisitions (Figure 1-1).

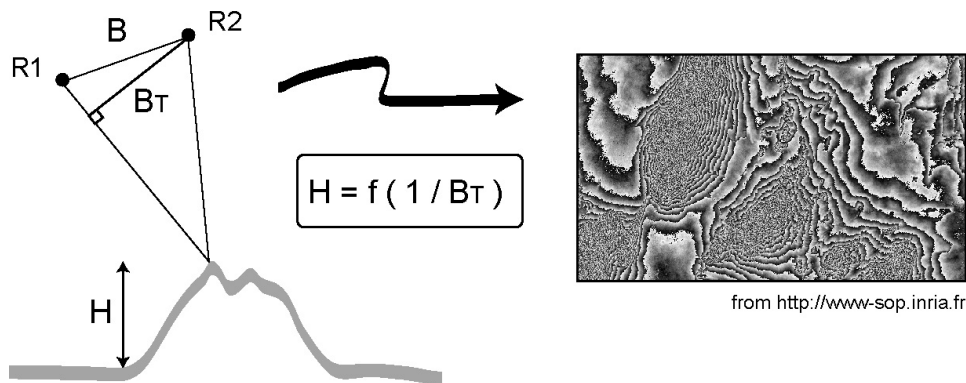


FIGURE 1-1 : CONFIGURATION D'ACQUISITION D'UN COUPLE D'IMAGE RADAR ET RELATION AVEC L'ALTITUDE D'UN POINT. LA SENSIBILITÉ DE L'INTERFÉROGRAMME (À DROITE) À LA TOPOGRAPHIE EST CONDITIONNÉE PAR LA DISTANCE ENTRE LES DEUX SATELLITES OU BASELINE B. H EST LA HAUTEUR EN UN POINT DE LA SURFACE.

Ce calcul est possible si la contribution atmosphérique est correctement modélisée et si on émet l'hypothèse que la zone d'étude n'a pas subi de déformation entre les deux acquisitions. La contrainte utilisée fait référence au principe de vision stéréoscopique sur lequel est basé la photogrammétrie (voir plus loin). Au sens large, on peut considérer que l'interférométrie radar utilisée à des fins de

reconstruction 3D du relief fait partie des techniques de photogrammétrie. La précision du MNT peut être grande car la précision de phase est fine, dépendant de la longueur d'onde généralement centimétrique. L'avantage considérable présentée par l'utilisation d'images radar est que l'onde n'est pratiquement pas atténuée lors de son passage dans l'atmosphère, permettant l'acquisition et l'exploitation de vues de jour comme de nuit, quelque soient les conditions de nébulosité.

La plupart des images radar exploitées sont des images satellites (exemple des satellites ERS et RADARSAT). Il existe cependant des techniques d'acquisition radar basées au sol permettant une cartographie terrestre plus locale (Pieraccini et al., 2001).

- La stéréophotogrammétrie à partir de photographies aériennes à axe vertical ou d'images satellites est la méthode la plus couramment utilisée pour créer des MNT. Les approches utilisées sont des approches classiques basées sur la mise en correspondance de points dans des couples d'images (photos aériennes ou images satellites), et sur une triangulation de ces correspondances aboutissant à un nuage dense de points 3-D permettant la reconstitution de la surface.

Sans rappeler ici tous les aspects théoriques et mathématiques, un bref rappel sur ce qu'est la photogrammétrie est nécessaire. Selon le « Manual of Photogrammetry » de l'American Society of Photogrammetry (Photogrammetry, 1980), la photogrammétrie est « la science ou la technique permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques ou produites par rayonnements électromagnétiques ou autres phénomènes ». Il s'agit d'une définition très large de la photogrammétrie, prenant en compte une variété importante d'images (y compris les images radar par exemple), où la notion de mesure est directement associée au terme.

D'un point de vue historique, le principe de la photogrammétrie est ancien et a été défini par le colonel français A. Laussedat (1819-1904) en 1852. C'est l'architecte allemand Albrecht Meydenbauer qui introduisit, en 1858, le terme de photogrammétrie, assemblant les mots grecs « photos », signifiant lumière, « gramma », quelque chose d'écrit ou de dessiné, et « metron », la mesure (Drap, 1997). L'ère de la photogrammétrie analogique commence réellement au début du 20^{ème} siècle lorsque le premier vrai appareil de restitution utilisant la vision stéréoscopique apparaît (création de la société Carl Zeiss en 1911).

La stéréophotogrammétrie (« stéréo » signifiant volume) s'appuie sur le principe de la perception du relief par vision stéréoscopique, phénomène identifié depuis le 12^{ème} siècle (travaux de Kepler et Huygens). D'un point de vue physiologique, nos deux yeux fournissent à notre cerveau, en raison de l'écartement interpupillaire, deux images légèrement différentes d'une même scène, mais celui-ci ne nous en restitue qu'une seule, avec une valeur de relief ajoutée. Cette opération de fusion s'effectue de la même façon si on fournit à nos deux yeux des images d'une même scène prises de deux points de vue différents dans des conditions géométriques proches de conditions physiologiques d'observation. Ce phénomène est illustré Figure 1-4 (section 1.2 « Éléments géométriques pour la reconstruction 3D »).

Il faudra attendre les années 70 et le développement des moyens de calcul (calculateurs électroniques) et des capteurs optiques pour entrer dans l'ère de la photogrammétrie numérique. Les

opérations jusqu'alors opto-mécaniques sont remplacées par des processus informatiques. C'est à ce moment que naît la photogrammétrie terrestre ou « close-range photogrammetry » (Atkinson, 1996), nouvelle technique dont l'émergence est liée en grande partie à l'application de la photogrammétrie au milieu industriel (métrologie industrielle en trois dimensions). L'utilisation de nouveaux capteurs abouti alors à de nouvelles approches, notamment les méthodes d'ajustement de faisceaux (ajustement simultané des faisceaux formés par l'ensemble des droites de visée issues de plusieurs clichés) et les méthodes d'étalonnage des capteurs (détermination des paramètres internes d'un capteur). Celles-ci vont considérablement élargir le champ d'application de la photogrammétrie.

Progressivement, le support numérique gagne du terrain et une nouvelle discipline apparaît dans les années 75: la photogrammétrie numérique ou vidéogrammétrie (Atkinson, 1996, Drap, 1997). Dès lors les recherches s'orientent vers une automatisation des procédés photogrammétriques, notamment en ce qui concerne la mise en correspondance automatique de points et l'extraction d'objets complexes dans une scène. Le terme de vidéogrammétrie est actuellement rarement employé pour désigner la photogrammétrie numérique en général, mais est plutôt associé au mode d'acquisition spécifique qu'est la vidéo. Pour éviter toute confusion et se rattacher au sens commun qu'il est en voie de prendre, on évitera d'employer trop fréquemment ce terme dans la suite du mémoire.

En ce qui concerne la modélisation de terrain, la plupart des concepteurs de stéréorestituteurs proposent aujourd'hui des outils de corrélation automatique, donnant des résultats satisfaisants tant sur le gain de temps que sur la précision de la mesure, notamment en ce qui concerne la modélisation de surfaces à l'échelle régionale (exemple de logiciel commercialisé : IMAGINE de ERDAS Inc.). Il faut préciser que, malgré l'expansion de la vidéogrammétrie, le support le plus couramment utilisé actuellement pour la réalisation de MNT par photogrammétrie aérienne est encore la photographie analogique digitalisée (scanner haute résolution), bien qu'une évolution rapide est observable dans ce domaine et qu'il est certain que le support numérique se sera largement répandu d'ici quelques années.

Les précisions des MNT sont variables et dépendent des outils de reconstruction utilisés (différents types d'algorithmes), du dispositif d'acquisition d'images et de la distance de prise de vue. Les précisions actuelles sont de l'ordre de plusieurs mètres (cas par exemple des MNT réalisés à partir d'images satellites de faible résolution) à quelques décimètres pour des méthodes plus récentes de reconstruction utilisant des équipements de haute technologie. C'est le cas avec l'utilisation d'images multi-spectrales de haute résolution acquises en association avec des systèmes couplés GPS / Centrale Inertielle (Inertial Navigation System) fournissant des informations sur la position et l'orientation du capteur optique (Gwinner et al., 2000). Une remarque est nécessaire en ce qui concerne la précision d'un MNT: il est nécessaire de ne pas confondre la précision d'un MNT et la précision d'un processus de reconstruction. En effet, il est possible de calculer une précision de reconstruction lié à la méthode de reconstruction elle-même, mais il est plus difficile d'estimer la précision vrai d'une reconstruction 3-D, nécessitant des informations sûres de terrain (réalité terrain). On peut en effet estimer la précision d'un MNT en comparant des points du modèle 3-D reconstruit avec des mesures GPS sur le terrain, cette comparaison restant cependant ponctuelle et lourde à

mettre en oeuvre. Les erreurs de reconstruction peuvent être locales, distribuées de façon aléatoire et isolées (Felicísimo, 1994). L'estimation de la précision d'un MNT reste un problème délicat.

Enfin on peut citer un exemple de méthode de mesures directes permettant de générer un MNT : les techniques de mesure laser aéroporté ou basé au sol. Les techniques aéroportées combinent la télémétrie laser à des systèmes de navigation GPS / Centrale Inertielle (GPS-INS) permettant le positionnement et l'orientation du laser. La mesure de distance est effectuée par la mesure du temps de propagation d'une onde électromagnétique. La reconstruction de la surface est alors calculée en combinant l'information sur la position et l'orientation du laser et la mesure directe effectuée par le laser (Vallet, 2002). Il s'agit de mesures directes pouvant être effectuées de jour comme de nuit et la densité de mesure peut être très grande (Figure 1-2).

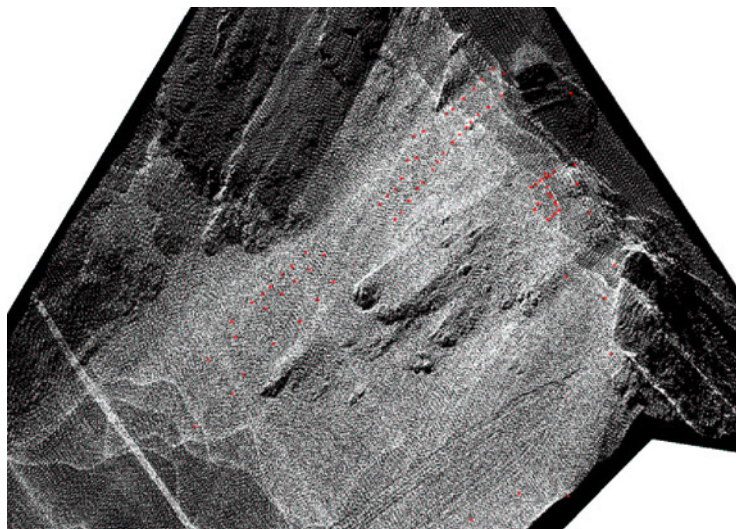


FIGURE 1-2 : EXTRAIT DE VALLET (VALLET, 2002). REPRÉSENTATION 3D DE POINTS MESURÉS PAR SCANNER LASER SUR UNE ZONE DE MONTAGNE ENNEIGÉE. LA DENSITÉ DES POINTS EST DE 20-30 POINTS/M² SUR CETTE ZONE.

Les précisions de reconstruction des points au sol annoncées par les constructeurs de tels systèmes sont de l'ordre de 5-15 cm, mais correspondent à des conditions idéales (terrain plat) et ne prennent en compte que les erreurs de position et d'orientation du système (Vallet, 2002). Ces techniques sont en général relativement coûteuses financièrement et en temps d'acquisition et de traitement des données (plusieurs jours).

1.1.2 UNE NOUVELLE APPROCHE PROPOSÉE

Les méthodes actuelles classiquement utilisées pour créer des MNT en Volcanologie, plus généralement en Sciences de la Terre et en Géographie, sont donc les techniques de stéréophotogrammétrie aérienne et satellitaire. Ces techniques présentent cependant un certain

nombre d'inconvénients et ne permettent pas toujours de répondre aux besoins des volcanologues. Il n'est pas question ici des problèmes liés au support utilisé pour la reconstruction, c'est-à-dire l'image (problèmes liés à la végétation, aux nuages, aux gaz volcaniques...), mais des limites imposées par les approches elles-mêmes.

Tout d'abord, en ce qui concerne la photogrammétrie aérienne classique, on peut parler de technique « lourde » sur le terrain dans le sens où elle implique généralement (1) une stéréopréparation importante, telle le positionnement de marqueurs au sol (Villeneuve, 2000), (2) une préparation de plans de vol rigoureux (Kraus and Waldhäusl, 1998), et (3) elle nécessite un équipement sophistiqué et coûteux (avions équipés de chambres de prise de vues). Il est difficile de mettre en oeuvre ce genre de campagnes dans le cadre de la surveillance régulière d'un édifice volcanique.

En ce qui concerne la photogrammétrie satellitaire, les principaux inconvénients sont en général liés à la difficulté d'accès aux images, au coût élevé de celles-ci, à leur résolution parfois insuffisante pour la réalisation de MNT précis, et à la fréquence d'acquisition d'images d'une scène cible du globe. Lorsqu'il est possible d'obtenir des images de haute résolution (exemple : satellite IKONOS fournissant des images panchromatiques d'une résolution de 1m.), les paramètres géométriques d'acquisition permettant une reconstruction 3D ne sont en général pas fournis de manière précise. Néanmoins, les perspectives d'évolution de la technologie dans ce domaine et les différents projets déjà établis pour l'avenir (exemple des futurs satellites « Pléiades », Baudoin et al., 2001) laissent penser que les contraintes évoquées ici seront sans doute levées, au moins en partie. Ces techniques sont bien adaptées à la réalisation de MNT à l'échelle régionale (dizaines à centaines de km²), mais le sont moins à plus petite échelle et dans le cadre de la surveillance d'un édifice volcanique.

Un autre problème majeur réside dans la reconstruction de surfaces de géométrie complexe, plus particulièrement les reliefs de très forte pente, comme les parois de cratères ou les cicatrices d'effondrements sur les volcans, à partir de vues verticales. Les surfaces quasi-verticales sont en effet mal représentées sur une photographie aérienne à axe optique vertical ou sur une image satellite. Ce manque d'informations ne permet alors pas une reconstruction précise et complète de ces surfaces (Kerle, 2002), qui sont d'un intérêt majeur en volcanologie (calculs de volumes de produits effondrés, analyses morphologique et structurale fines permettant la prévention de risques d'effondrement...).

Enfin, un autre point faible de ces techniques est la précision des MNT réalisés. La précision recherchée dépend en effet de l'objet d'étude: une précision métrique sera par exemple insuffisante s'il s'agit d'étudier la fracturation d'un dôme de lave, mais suffira à l'étude du réseau de failles d'une région. Actuellement, on peut souligner la difficulté d'obtenir des MNT locaux de haute résolution, cette difficulté étant liée aux différents points exposés plus haut.

Ces considérations nous ont mené à développer une nouvelle approche de reconstruction qui pourrait venir en complément de celles déjà utilisées et qui prend en compte les difficultés actuelles d'adaptation de ces méthodes à la volcanologie. Les récents travaux dans le domaine de la Vision par Ordinateur en ce qui concerne la reconstruction 3-D et le calibrage des capteurs ont montré qu'il est possible d'appliquer de nouveaux outils de reconstruction en volcanologie. L'approche développée est

une approche vidéogrammétrique, c'est-à-dire une approche de reconstruction 3-D à partir d'images numériques, reposant sur une première phase de calibrage d'un capteur par ajustement de faisceaux, et sur une seconde phase de reconstruction 3-D utilisant plusieurs vues prises autour d'un objet à reconstruire (vues obliques). On parle de reconstruction multi-vues (N-view reconstruction). Cette phase de reconstruction s'appuie sur la déformation itérative d'un modèle 3D initial (Figure 1-3).

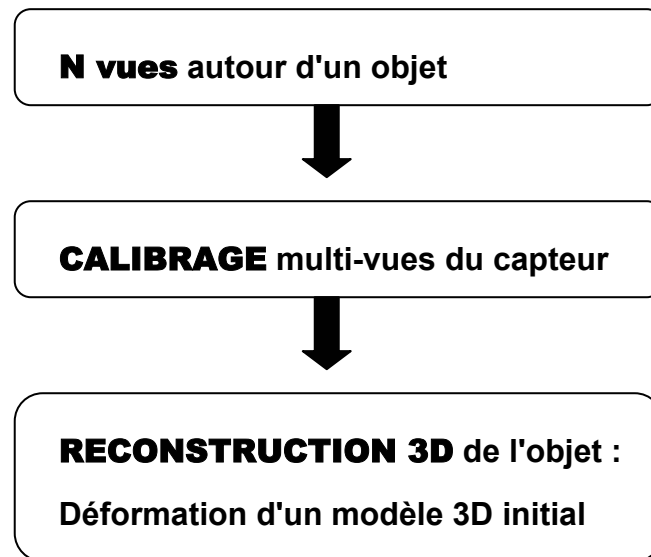


FIGURE 1-3 : ORGANIGRAMME DÉCRIVANT GLOBALEMENT LA NOUVELLE APPROCHE PROPOSÉE.

Une deuxième motivation à l'origine du développement d'une nouvelle approche fût le besoin d'un outil de mesure de surface et de déformation en volcanologie expérimentale utilisant les avancées actuelles dans le domaine de la reconstruction 3D. L'application de la photogrammétrie en volcanologie expérimentale est très récente (Donnadieu et al., 2003). La photographie de modèles analogiques était jusqu'à présent le support d'une analyse principalement qualitative. Le besoin de confronter les observations et mesures de terrain avec les résultats de modèles analogiques dimensionnés nous a conduit à explorer les possibilités actuelles de reconstruction 3D en laboratoire. Bien que la stéréophotogrammétrie classique (couple stéréoscopique à axe optique vertical et corrélation dense) soit une des solutions qui existe, nous avons cherché à proposer une méthode originale utilisant les travaux récents de Vision par Ordinateur. La méthode est d'ailleurs développée en laboratoire, pour des raisons de simplicité et de besoins de quantification en modélisation analogique.

Comparativement aux méthodes de reconstruction classiques utilisées, les avantages suivants sont attendus :

(1) L'utilisation de plusieurs vues d'un même objet permet de fournir une richesse d'information plus grande, et promet un gain dans la précision de la reconstruction 3D.

- (2) Une simplicité et une flexibilité de mise en œuvre de la méthode sont attendues concernant le mode d'acquisition des vues et le calibrage du capteur.
- (3) Une meilleure gestion des surfaces de géométrie complexe, notamment des reliefs de forte pente, est envisagée grâce à l'utilisation de vues obliques.
- (4) Dans la perspective d'une application terrain, un coût financier moindre est espéré. L'idée est de s'affranchir du matériel spécifique à la photogrammétrie pour l'acquisition des vues.

1.2 ÉLÉMENTS GÉOMÉTRIQUES POUR LA RECONSTRUCTION 3D

Il s'agit de donner dans ce paragraphe quelques éléments mathématiques, notamment géométriques, nécessaires à une meilleure compréhension de la reconstruction 3D en Vision par Ordinateur et des approches développées autour de cette problématique. Après un bref rappel sur le principe de la perception 3D, les différents espaces 3D utilisés en reconstruction seront alors présentés de manière très simple. On définira ensuite rapidement en quoi consiste la géométrie épipolaire et les principaux éléments de la géométrie multi-vues seront abordés. Le calibrage d'un capteur, élément essentiel lorsque l'on traite de reconstruction 3D, ne sera volontairement pas évoqué dans ce paragraphe car il fait l'objet d'une description détaillée au sein du chapitre II concernant la méthode de reconstruction développée.

1.2.1 STÉRÉO VISION : PERCEPTION DE L'ESPACE TRIDIMENSIONNEL

D'un point de vue physiologique, la perception du relief s'effectue chez l'Homme en grande partie selon le principe de la stéréoscopie (aussi appelé vision binoculaire ou stéréopsie). L'abréviation stéréo pourra être employée dans le texte. L'écartement des deux globes oculaires fournit au cerveau deux images légèrement différentes d'une même scène. Pourtant la scène nous apparaît comme une seule image nette à laquelle s'ajoute une perception de la troisième dimension. Le cerveau interprète en effet les différences entre les deux images comme étant des différences de profondeur dans la scène, ceci sans aucune analyse intellectuelle de la scène. La Figure 1-4 schématise le système de stéréoscopie.

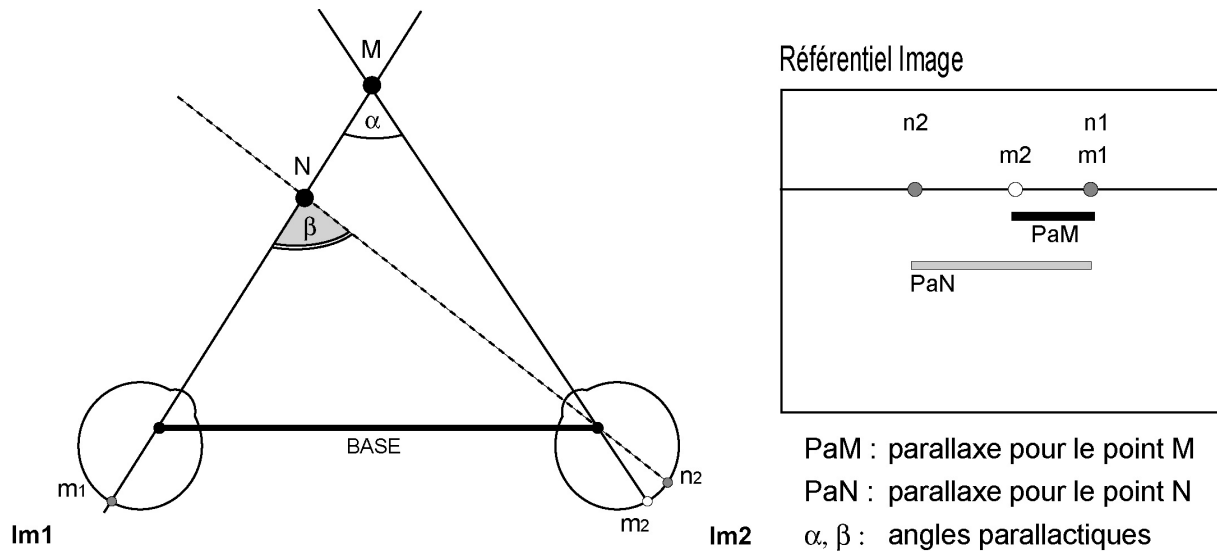


FIGURE 1-4 : VISION STÉRÉOSCOPIQUE. M ET N SONT DEUX POINTS DE L'ESPACE. $M_1, N_1,$ ET M_2, N_2 SONT LEURS PROJECTIONS RESPECTIVES DANS LES IMAGES Im_1 ET Im_2 .

Les termes suivants peuvent être définis :

La **base**, en l'occurrence la base oculaire dans le cas de la vision humaine, est la distance entre les deux points d'observation.

La **parallaxe** représente le décalage apparent du point P dans les deux images formées Im_1 et Im_2 . Ce décalage dépend de l'angle formé par le point P et les deux axes optiques, appelé angle parallaxique. Dans le cas de la vision binoculaire, qui correspond à une configuration stéréoscopique standard (Figure 1-5), cette parallaxe correspond à un décalage selon X dans le plan de l'image, et est dite horizontale ou longitudinale. Dans le cas d'une configuration stéréoscopique quelconque, il existe également une parallaxe transversale, définie selon Y dans le plan de l'image. Elle survient par exemple lorsque les deux plans image ne sont pas coplanaires, ou lorsque que les images sont coplanaires mais qu'il existe une rotation entre les deux (Figure 1-6).

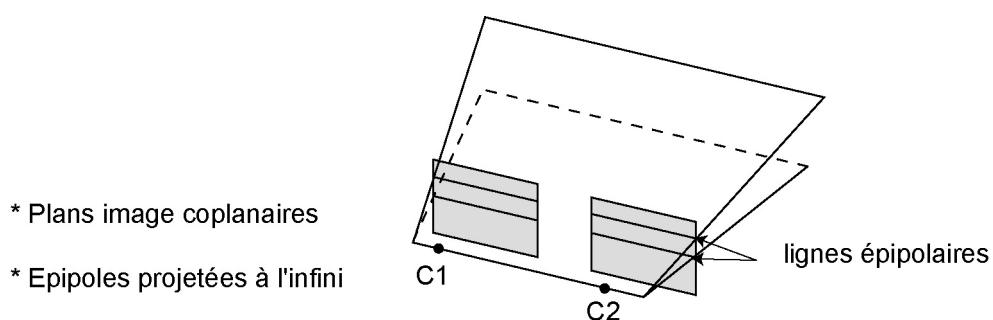


FIGURE 1-5 : CONFIGURATION STÉRÉOSCOPIQUE STANDARD.

Images non coplanaires avec inclinaison par rapport à Y

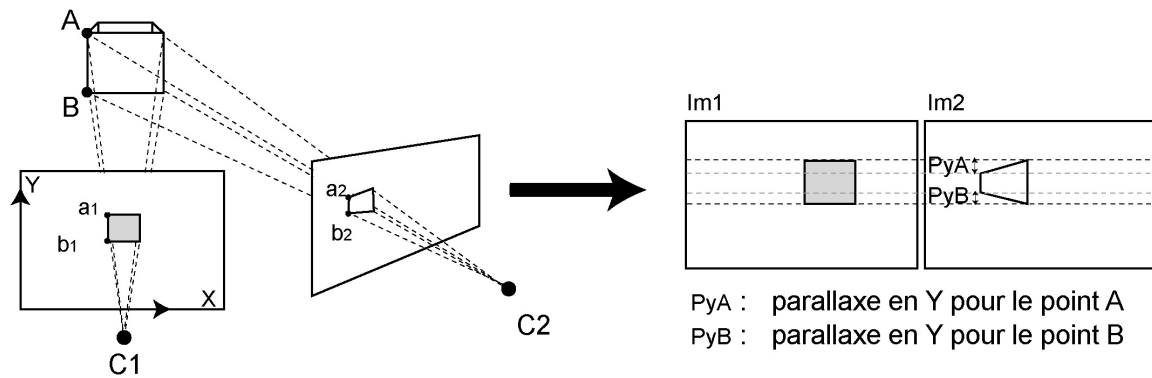


FIGURE 1-6 : EXEMPLE DE PARALLAXE TRANSVERSALE.

Nous nous limitons à ce bref rappel concernant la stéréovision car la perception de la profondeur est un vaste sujet qui fait intervenir de nombreux autres mécanismes et indicateurs d'informations, et qui est l'objet d'une abondante littérature.

1.2.2 DE LA RECONSTRUCTION PROJECTIVE À LA RECONSTRUCTION EUCLIDIENNE

Quelques concepts de la géométrie projective sont introduits dans ce paragraphe. La géométrie projective est en effet la géométrie qui modélise le mieux la formation d'une image (Faugeras, 1993) et qui permet un formalisme uniforme en Vision par Ordinateur. Elle repose sur la notion de projection centrale ou conique (Figure 1-7), projection selon laquelle un point M de l'espace se projette sur un plan P de telle sorte que O , le centre d'observation, M et M' soient alignés. Le point M' est la perspective du point M sur P .

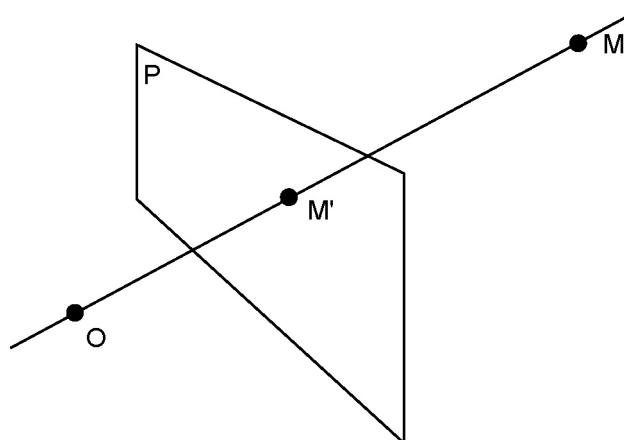


FIGURE 1-7 : PROJECTION CENTRALE. P EST LE PLAN IMAGE.

Une description euclidienne du monde 3D est cependant généralement faite. Nous verrons alors quelles sont les étapes transitives entre une géométrie perspective et une géométrie euclidienne. Les divers éléments décrits ci-après peuvent être retrouvés dans Pollefeys (Pollefeys, 2000).

1.2.2.1 L'espace projectif.

Soit P^n l'espace projectif de dimension n . Un point X de cet espace est représenté par un vecteur de taille $(n+1)$: $X = (x_1, \dots, x_{n+1})^T$ dont au moins une des coordonnées est différente de zéro. Ces coordonnées sont appelées **coordonnées homogènes**.

Deux points X et Y sont égaux s'il existe un scalaire $\lambda \neq 0$ tel que $x_i = \lambda \cdot y_i$, avec $i \in [1, n+1]$. Alors on dit que X et Y sont équivalent à un facteur d'échelle près : $X \sim Y$.

Soit à présent P^3 l'espace projectif 3D. Un point de P^3 est représenté par le vecteur M : $M = (X, Y, Z, W)^T$. Un point M est sur un plan Π si et seulement si :

$$\Pi^T \cdot M = 0 \quad \text{Eq. 1-1}$$

Le plan projectif est l'espace projectif 2D P^2 . Un point de P^2 est représenté par le vecteur m : $m = (x, y, w)^T$. Une droite est également représentée par un vecteur de taille 3. Un point m est sur la droite l si et seulement si :

$$l^T \cdot m = 0 \quad \text{Eq. 1-2}$$

Cette équation représente également une droite passant par le point m . Cette symétrie correspond au principe de Dualité ; il n'existe pas de différence entre les points et les droites dans l'espace projectif :

Une droite l passant par deux points m_1 et m_2 est donnée par le produit vectoriel de m_1 et m_2 et peut également s'écrire de la manière suivante :

$$l \sim [m_1]_x \cdot m_2 \quad \text{avec} \quad [m_1]_x = \begin{bmatrix} 0 & w_1 & -y_1 \\ -w_1 & 0 & x_1 \\ y_1 & -x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 1-3}$$

Une transformation dans les images de $P^2 \rightarrow P^2$ est appelée **homographie** et est représentée par une matrice H (3x3).

H et $\lambda \cdot H$ représentent la même homographie à un facteur d'échelle près $\lambda \neq 0$.

Un point m_1 est transformé comme suit :

$$m_1 \rightarrow m_2 \sim H \cdot m_1 \quad \text{Eq. 1-4}$$

Une droite l_1 est transformée comme suit :

Soit un point m_2 sur l_2 . D'après l'équation Eq. 1-2, on peut écrire :

$$l_1^T \cdot m_1 = l_2^T \cdot m_2 = 0$$

Selon l'équation Eq. 1-4, on peut remplacer m_2 par son équivalent dans la formule précédente :

$$l_1^T \cdot m_1 = l_2^T \cdot \mathbf{H} \cdot m_1$$

Qui s'écrit encore :

$$l_2^T = l_1^T \cdot \mathbf{H}^{-1}$$

Cette dernière équation donne la relation entre deux droites correspondantes :

$$l_1 \rightarrow l_2 \sim \mathbf{H}^{-T} \cdot l_1 \quad \text{Eq. 1-5}$$

Ces équations sont également valables pour la transformation de points et de plans dans l'espace 3D P^3 selon la matrice (4x4) \mathbf{T} :

$$M_1 \rightarrow M_2 \sim \mathbf{T} \cdot M_1 \quad \text{Eq. 1-6}$$

$$\Pi_1 \rightarrow \Pi_2 \sim \mathbf{T}^{-T} \cdot \Pi_1 \quad \text{Eq. 1-7}$$

1.2.2.2 De la géométrie projective à la géométrie euclidienne

Comme il a été évoqué dans l'introduction de ce paragraphe, le monde qui nous entoure est généralement décrit de manière euclidienne. L'espace euclidien est donc l'espace requis lors de la reconstruction 3D d'une scène. Le passage d'une géométrie projective à une géométrie euclidienne, peut être vu comme une succession de strates correspondant chacune à une géométrie particulière et fournissant une description de plus en plus fidèle du monde 3D. Il s'agit des strates projective, affine, métrique et euclidienne.

Chacune de ces géométries possède un type propre de transformations et des invariants spécifiques, un invariant étant, comme son nom l'indique, une propriété ou configuration géométrique qui ne varie pas lors d'une transformation.

Notre intention n'est pas de décrire chacune de ces géométries mais seulement de résumer par la figure et le tableau suivants (Figure 1-8 et Tableau 1-1) les différentes strates énumérées, quelques paramètres importants et une visualisation simple des transformations associées.

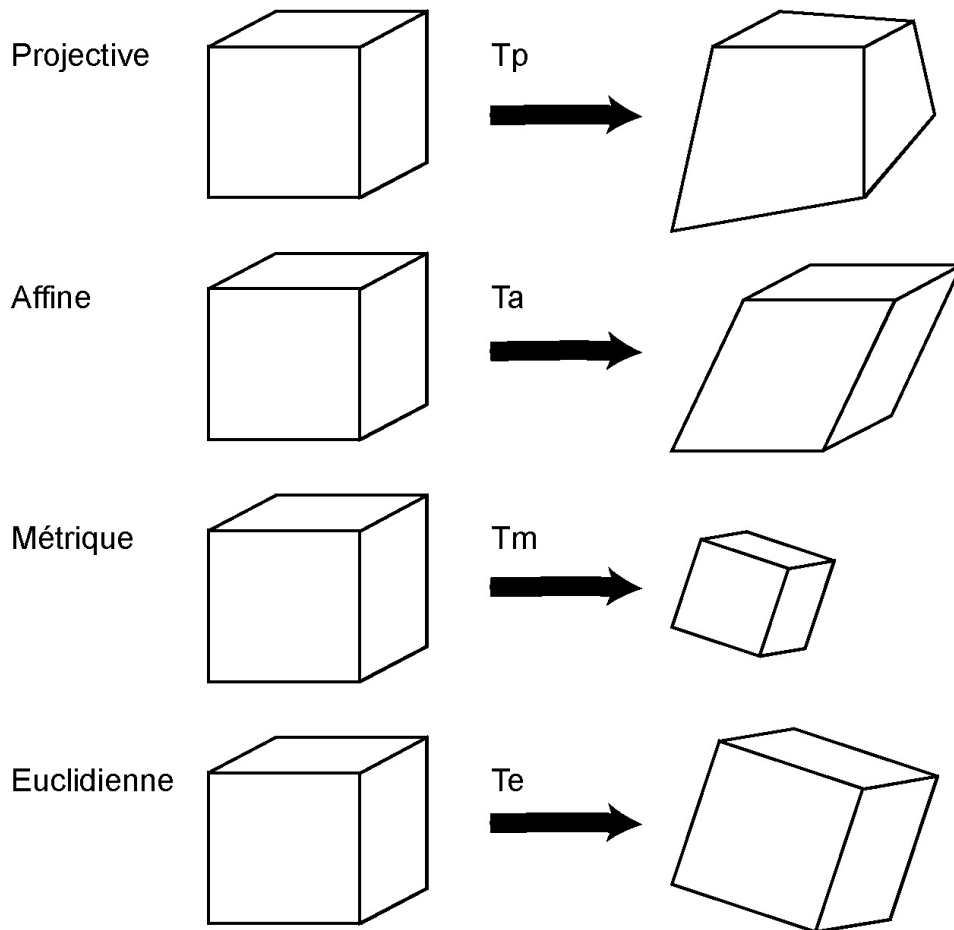


FIGURE 1-8 : LES DIFFÉRENTES STRATES GÉOMÉTRIQUES ET LES DÉFORMATIONS ASSOCIÉES (D'APRÈS POLLEFEYS, 2000). T_p , T_a , T_m ET T_e SONT LES TRANSFORMATIONS PROJECTIVE, AFFINE, MÉTRIQUE ET EUCLIDIENNE.

Plus de détails sur la formulation mathématique du passage entre les différentes strates sont donnés dans Pollefeys (Pollefeys, 2000).

La seule reconstruction possible à partir d'images sans information de calibrage du capteur (paramètres internes et externes, voir chapitre 2 paragraphe 2.2.1) est une reconstruction projective, c'est-à-dire que la reconstruction se fait à une matrice de projection près. Le passage d'une reconstruction projective à une reconstruction métrique, c'est-à-dire à un facteur d'échelle près, ou à une reconstruction euclidienne est possible grâce à l'apport des contraintes supplémentaires (exemple des méthodes de reconstruction interactives, paragraphe 1.3.3.5).

Géométrie	Degrés de liberté	Transformation	Invariants
Projective	15	$T_p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix}$	Bi-rapports
Affine	12	$T_a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	Distances relatives selon une direction Parallélisme Plan à l'infini
Métrique	7	$T_m = \begin{pmatrix} \sigma r_{11} & \sigma r_{12} & \sigma r_{13} & t_x \\ \sigma r_{21} & \sigma r_{22} & \sigma r_{23} & t_y \\ \sigma r_{31} & \sigma r_{32} & \sigma r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	Distances relatives Angles Coniques absolues
Euclidienne	6	$T_e = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	Distances absolues

TABLEAU 1-1 : LES DIFFÉRENTES STRATES GÉOMÉTRIQUES ET LEURS PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES (D'APRÈS POLLEFEYS, 2000).

1.2.3 GÉOMÉTRIE ÉPIPOLAIRE

La géométrie épipolaire concerne les relations entre les points correspondants dans deux images. La Figure 1-9 résume ces relations.

Soit un point M de l'espace se projetant en m_1 et m_2 sur deux images Im_1 et Im_2 dont les centres optiques sont C_1 et C_2 . Le plan Π défini par (M, C_1, C_2) est appelé **plan épipolaire**. L'intersection du plan épipolaire avec les deux images correspond aux **lignes épipolaires** l_1 et l_2 (le rayon optique issu de C_1 et passant par M se projette sur Im_2 en l_2). Tous les points du plan épipolaire se projettent sur ces droites. l_1 et l_2 sont des correspondances épipolaires, c'est-à-dire que tout point de Im_1 se trouvant sur l_1 a son correspondant sur l_2 dans Im_2 , et vice et versa.

L'ensemble des plans épipolaires, soit les plans passant par les centres optiques C_1 et C_2 , forment un ensemble de lignes épipolaires dans chacune des images. L'intersection des ces droites dans chaque image résulte en deux points spécifiques e_1 et e_2 appelés **épipoles**, qui correspondent à la projection respective de C_2 et C_1 dans les images Im_1 et Im_2 .

La contrainte épipolaire s'exprime alors ainsi : tout point 3D de l'espace se projetant dans une image Im_1 se trouve sur la ligne épipolaire l_2 de l'image Im_2 . Cette restriction concernant la position de la projection d'un point 3D dans deux images est utilisée dans la recherche de correspondances entre images, aussi appelé problème de mise en correspondance.

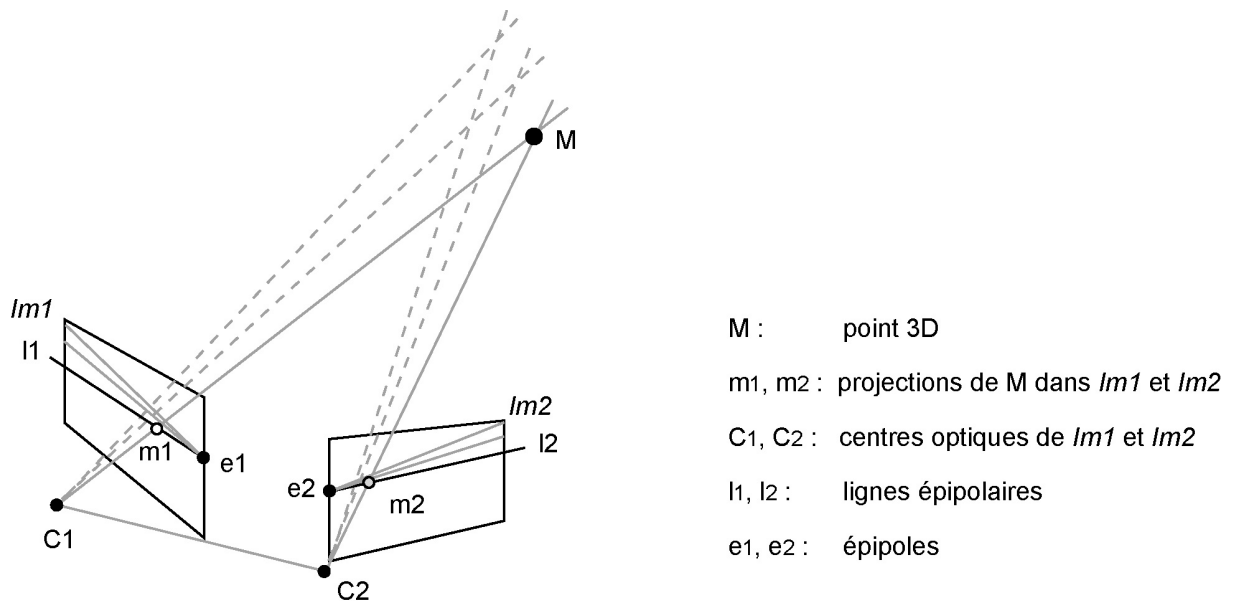


FIGURE 1-9 : SCHÉMATISATION DE LA GÉOMÉTRIE ÉPIPOLAIRE.

D'un point de vue mathématique, la géométrie épipolaire peut s'exprimer comme suit (Pollefeys, 2000):

- Expression de la droite passant par m_1 et l'épipole e_1 d'après l'équation Eq. 1-3 :

$$l_1 \sim [e_1]_x \cdot m_1 \tag{Eq. 1-8}$$

Le signe (\sim) signifie équivalent à un facteur d'échelle près ($A \sim B \Leftrightarrow \exists \lambda \neq 0 : A = \lambda \cdot B$).

$[e_1]_x$ est la matrice (3x3) antisymétrique représentant le produit vectoriel avec e_1 .

Soit P_1 la matrice (3x4) de projection du capteur permettant le passage d'un point 3D dans le référentiel image Im_1 lors de la formation de l'image (voir paragraphe 2.2.1.1 chapitre 2 sur le calibrage d'un capteur pour plus de détails sur la composition de cette matrice) :

$$m_1 \sim P_1 \cdot M \tag{Eq. 1-9}$$

Selon les équations Eq. 1-9, Eq. 1-1 et Eq. 1-2, on peut écrire :

$$l_1^T \cdot m_1 \sim l_1^T \cdot P_1 \cdot M \sim \Pi^T \cdot M$$

On peut alors exprimer le plan épipolaire Π des deux manières suivantes :

$$\Pi \sim P_1^T \cdot l_1 \text{ et } \Pi \sim P_2^T \cdot l_2$$

avec P_1^T , P_2^T les matrices transposées de P_1 et P_2 .

1. Soit en combinant ces deux dernières équations on obtient la relation entre les deux lignes épipolaires :

$$l_2 \sim (P_2^T)^\dagger \cdot P_1^T \cdot l_1 \equiv H^{-T} \cdot l_1$$

Le symbole \dagger indique la pseudo-inverse Moore-Penrose (Soit une matrice $B(m \times n)$: $B^\dagger = (B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T$ avec $(B^T \cdot B)$ la matrice Identité). Cette équation est identique à l'équation Eq. 1-5, H représentant une homographie.

En combinant les équations Eq. 1-8 et Eq. 1-5, il vient :

$$l_2 \sim H^{-T} \cdot [e_1]_x \cdot m_1$$

Soit $F = H^{-T} \cdot [e_1]_x$. On a alors la relation suivante :

$$l_2 \sim F \cdot m_1 \tag{Eq. 1-10}$$

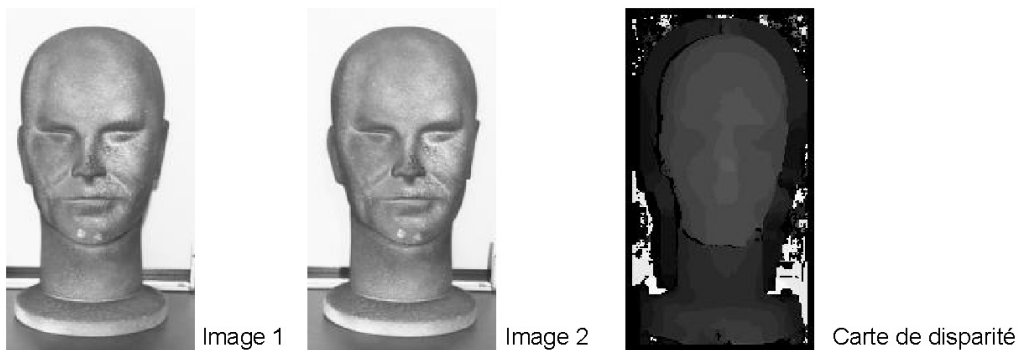
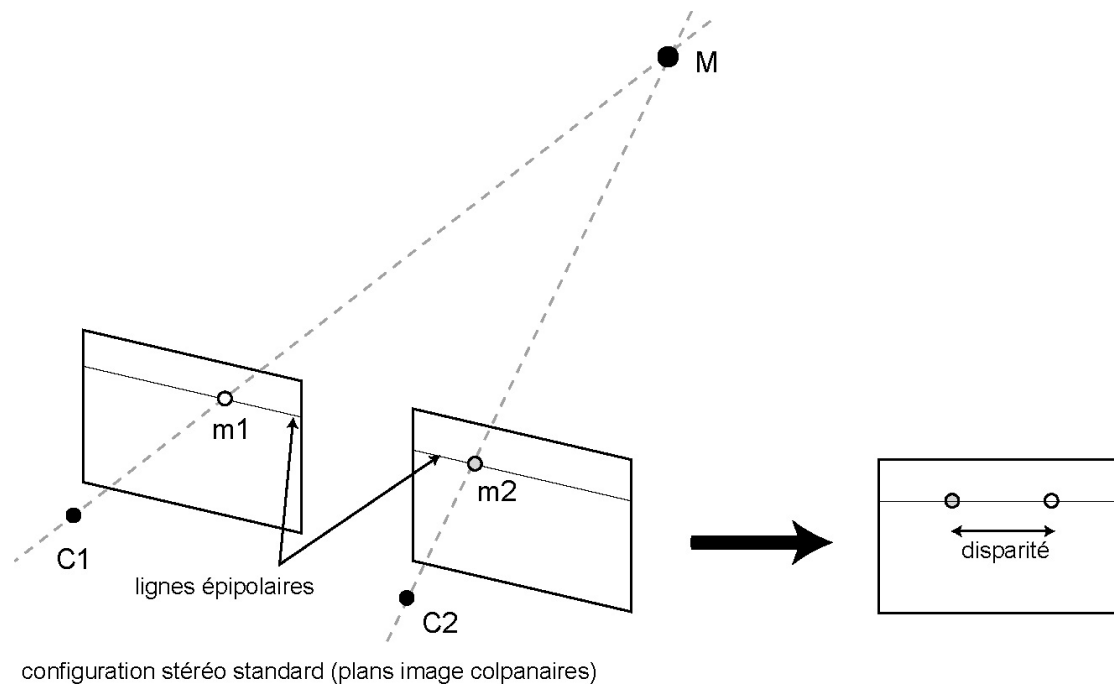
2. D'après l'équation Eq. 1-10 et sachant que $l_2^T \cdot m_2 = 0$, on obtient la relation qui existe entre deux points correspondants :

$$m_2^T \cdot F \cdot m_1 = 0 \tag{Eq. 1-11}$$

F est appelée **matrice fondamentale**. Cette matrice peut être calculée si les paramètres du capteur sont connus, fournissant ainsi une contrainte pour la mise en correspondance. Inversement, si les paramètres du capteur sont inconnus, il est possible de déterminer F à partir de correspondances établies entre images. Étant donnée que F est une matrice (3x3) déterminée à un facteur d'échelle près, soit (9-1) paramètres inconnus, seules 8 paires de points correspondants sont théoriquement nécessaires pour la calculer de manière linéaire (Luong, 1992).

Considérons les projections correspondantes m_1 et m_2 dans les images Im_1 et Im_2 , aussi appelés **points homologues**. La différence de position des points homologues dans leur image respective est appelée **disparité**, qui est un synonyme de la parallaxe. Une mise en correspondance dense, soit la mise en correspondance de tous les points communs à deux images prises de points de vue légèrement différents, permet d'établir une **carte de disparité** (Figure 1-10). Cette dernière peut être transformée en **carte de profondeur** si les relations de projection 3D / 2D permettant la triangulation

des points homologues sont connues (paramètres internes et externes du capteur connus, voir chapitre 2).



extrait de <http://www.enseignement.polytechnique.fr>

FIGURE 1-10 : SCHÉMATISATION DE LA DISPARITÉ DANS UNE CONFIGURATION STÉRÉOSCOPIQUE STANDARD (FIGURE 1-5) ET EXEMPLE DE CARTE DE DISPARITÉ. UNE VALEUR DE DISPARITÉ EST ATTRIBUÉE À CHAQUE PIXEL. DANS L'EXEMPLE, LES ZONES LES PLUS CLAIRES CORRESPONDENT AUX DISPARITÉS LES PLUS GRANDES.

1.2.4 GÉOMÉTRIE MULTI-VUES

Considérons N vues disponibles, $N > 2$. Il est alors possible de regrouper ces images par paires et décrire ainsi leur géométrie à l'aide des relations vues précédemment. En effet, soient trois images d'une même scène et deux points homologues m_i et m_j dans les images Im_i et Im_j . Il est possible de calculer la position de m_k dans l'image Im_k , soit par l'intersection des lignes épipolaires

des points m_i et m_j dans Im_k , soit par triangulation avec m_i et m_j puis projection du point 3D M résultant dans Im_k (Figure 1-11).

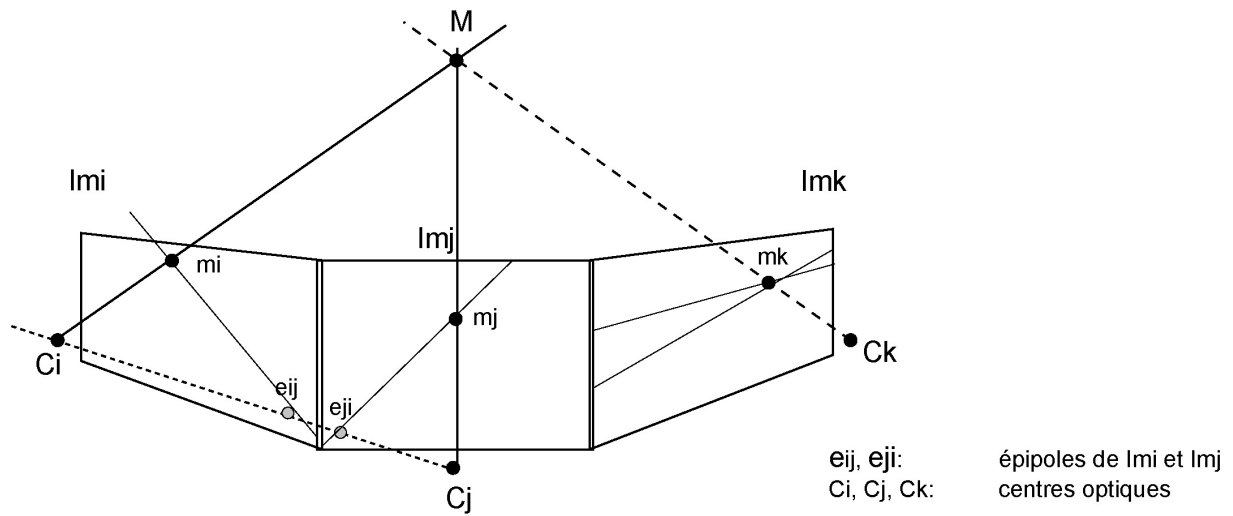


FIGURE 1-11 : RELATIONS D'UN POINT DANS 3 IMAGES.

Cependant la géométrie épipolaire ne suffit pas à rendre compte entièrement de la géométrie multi-vues. Dans le cas de trois images, lorsqu'un point 3D se trouve dans le plan trifocal, plan passant par les trois centres de projection C_i , C_j et C_k , le système est indéterminé, sauf si on passe par une triangulation pour obtenir d'abord le point 3D à partir de deux images, puis par une projection de ce point dans la troisième image.

Néanmoins, il existe des contraintes supplémentaires concernant les points et les droites dans le cas de trois images. Il s'agit de relations linéaires dont les coefficients sont regroupés sous forme de tenseur, appelé **tenseur trifocal T** dans le cas de trois images. Ce dernier est un opérateur cubique ($3 \times 3 \times 3$) composé de 27 scalaires et seulement 18 degrés de liberté. Il est l'analogue de la matrice fondamentale dans le cas de trois vues et exprime les relations entre les points et/ou les droites homologues de manière linéaire (Figure 1-12).

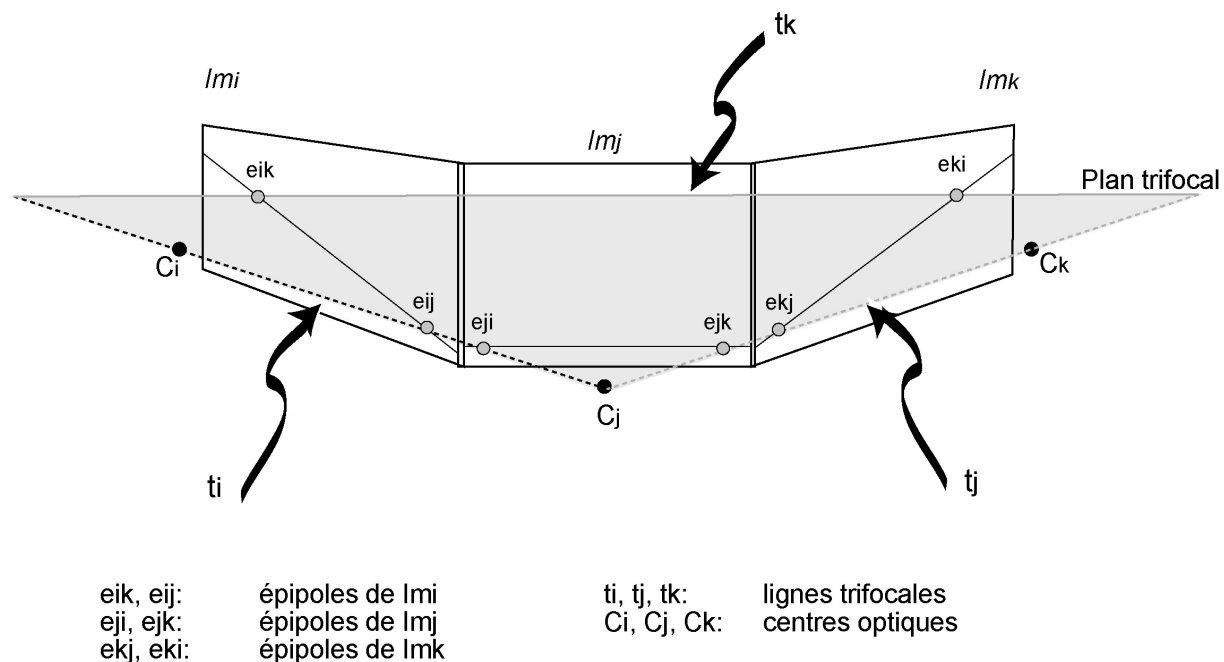


FIGURE 1-12 : GÉOMÉTRIE TRIFOCAL.

La relation entre trois images i , j et k pour un point M de l'espace se projetant en m_i , m_j et m_k est la suivante :

$$m_i \cdot (m_j \cdot m_k \cdot T_{i33} - m_k \cdot T_{ij3} - m_j \cdot T_{i3k} + T_{ijk}) = 0 \quad \text{Eq. 1-12}$$

La relation concernant trois droites correspondantes est :

$$l_i \sim l_j \cdot l_k \cdot T_{ijk} \quad \text{Eq. 1-13}$$

Plus généralement, un N -uplet de points homologues doit satisfaire $(2N - 3)$ contraintes indépendantes. N projections d'une droite dans l'espace, possédant quatre degrés de liberté, présente $(2N - 4)$ contraintes.

Il existe également le tenseur quadrifocal pour les relations existant entre quatre images. Au-delà, il n'y a pas de contraintes supplémentaires (Moons, 1998).

1.3 RECONSTRUCTION 3-D MULTI-VUES EN VISION PAR ORDINATEUR

1.3.1 INTRODUCTION

La reconstruction 3-D d'objets et de leur environnement à partir d'une série d'images est l'un des problèmes majeurs adressés à la communauté de Vision par Ordinateur. Comme le titre du paragraphe l'indique, nous évoquerons uniquement les approches existantes de reconstruction 3D utilisant N vues d'une scène étant donné notre cadre d'application.

Une variété importante d'approches a été développée pour répondre au problème de la reconstruction 3D. Toujours selon le cadre d'application qu'est le nôtre, l'accent est mis, dans ce paragraphe, sur les méthodes de reconstruction dites « passives », par opposition aux méthodes « actives ». Ces dernières interviennent sur l'éclairage de la scène à reconstruire par projection de lumière structurée par exemple (Bouquet and Perona, 1998) ou par des techniques de projection laser, ce qui simplifie le problème de reconstruction 3D aux dépens d'une vaste applicabilité. Les méthodes « passives », de part leur flexibilité, sont plus adaptées aux exigences de reconstruction en volcanologie, notamment en ce qui concerne la reconstruction de sites naturels où un contrôle de la lumière semble difficile. En revanche, dans des conditions de laboratoire, les méthodes « actives » peuvent parfois constituer une solution intéressante.

Concrètement, la complexité du processus de reconstruction 3D peut être vue comme étant fonction (1) des informations de calibrage du capteur initialement disponibles ainsi que du modèle de caméra choisi (voir chapitre 2 pour plus de détail sur le calibrage d'un capteur), (2) de la complexité et du type de scène à reconstruire, mais également (3) du degré d'automatisation du processus désiré et (4) du temps nécessaire à la reconstruction. Un cas extrême consisterait à reconstruire une scène complexe, un environnement urbain dense par exemple ou un paysage au relief difficile, sans aucune information sur le capteur utilisé et sans autre intervention d'un opérateur que l'acquisition des données. Les principaux efforts réalisés, encore actuellement, concernent à la fois l'automatisation maximale du processus, la conservation d'une flexibilité la plus grande possible quant au capteur utilisé (de préférence un appareil grand public de moindre coût et simple d'utilisation) et à la prise de vue (le moins de contraintes possibles concernant l'acquisition), et enfin la qualité de la reconstruction 3D et de son rendu.

Les domaines d'application sont nombreux. Les plus anciennes applications sont relatives à l'architecture et à la cartographie, parallèlement à la naissance de la photogrammétrie et plus tard le développement de la photogrammétrie aérienne. Les avancées scientifiques concernant la reconstruction 3D grâce à l'image sont aujourd'hui largement utilisées par la médecine, la navigation robotique, la surveillance visuelle dans l'industrie, mais aussi tous les domaines scientifiques où la visualisation et la mesure 3D d'objets et de sites naturels constitue un outil de prime importance. C'est le cas en Sciences de la Terre, en Sciences de la Vie, en Géographie et dans beaucoup d'autres

disciplines. Les sollicitations actuelles dans les domaines de l'Infographie (Computer Graphics), de la Réalité Virtuelle ou de la Communication vont croissant, exprimant au passage des exigences qui viennent nourrir la recherche par la formulation de nouveaux problèmes et le développement de nouvelles approches.

1.3.2 POURQUOI L'UTILISATION DE PLUSIEURS VUES POUR LA RECONSTRUCTION 3D ?

D'un point de vue historique, les années 70 ont été marquées par l'apparition de nouveaux capteurs et supports d'enregistrement (video, CCD) moins coûteux et plus commodes d'emploi. La résolution alors médiocre de ces nouveaux capteurs, provoquant par conséquent une perte d'information comparativement aux anciennes techniques d'acquisition employées, aurait encouragé l'utilisation de plusieurs vues d'un même objet (Drap, 1997).

Deux vues différentes d'une même scène sont nécessaires pour recouvrir l'information 3D. Le passage à l'utilisation de N vues est un processus relativement naturel. Tout d'abord d'un point de vue scientifique, l'utilisation de N vues plutôt qu'un couple de vues représente un degré de complexité supérieur en reconstruction 3D, et en ce sens explique de manière simple l'intérêt du monde scientifique pour ce problème. Un développement considérable de la compréhension et de la modélisation multi-vues en Vision par Ordinateur s'est produit ces dernières années (Faugeras, 1996, Hartley and Zisserman, 2000). D'autre part, l'utilisation de plusieurs vues semble également découler de l'observation suivante : l'Homme, dans son appréhension de l'environnement, aura tendance à lui-même utiliser un maximum d'informations visuelles et par conséquent plusieurs vues du monde qui l'entoure plutôt que se contenter d'une visée fixe lui donnant une info instantanée mais incomplète sur l'espace 3D. Les principaux avantages du « multi-vues » en reconstruction 3D sont (1) une richesse accrue en informations sur la scène à reconstruire, (2) un apport de contraintes supplémentaires pour le processus de reconstruction (redondance), notamment pour une triangulation de points 3D, et enfin (3) une réduction des occlusions inhérentes à la présence de plusieurs objets dans une scène et/ou à la complexité d'une surface (paragraphe 1.3.3.3 « Déformation de modèles de surface »).

1.3.3 LES DIFFÉRENTES APPROCHES POSSIBLES

Il existe différentes manières d'aborder le problème de la reconstruction multi-vues selon les informations disponibles, les hypothèses initiales introduites et l'objectif recherché. Ce dernier peut parfois être conditionné par un type d'application particulier, présentant des exigences spécifiques. La reconstruction 3D ne sera en effet pas abordée de la même manière s'il s'agit de faire de la mesure, de la reconnaissance d'objet ou de la représentation réaliste d'une scène. Certaines applications particulières en métrologie industrielle nécessitent par exemple l'utilisation d'un système d'acquisition fixe et autonome, ainsi qu'une reconstruction très précise de l'objet d'étude (Garcia, 2001). Le rendu

de la modélisation ne constitue en général pas une priorité dans un tel cadre d'application. A l'opposé, la reconstruction grossière d'une scène à partir d'une séquence vidéo, constitue un problème type pour certaines applications de Réalité Virtuelle, notamment dans le domaine de la Communication. Les efforts peuvent dans ce cas s'orienter vers les problèmes d'autocalibrage du système (pas de connaissance à priori sur le capteur et la géométrie d'acquisition des vues) et du rendu de la reconstruction.

Les informations disponibles, ainsi qu'un certain nombre d'hypothèses émises en début de problème vont également influencer la démarche de reconstruction. Elles concernent en général :

- le nombre de vues, leur géométrie dans l'espace (vues proches ou espacées, concentration des vues dans un espace réduit, selon un plan etc...),
- le type de scène à reconstruire,
- le degré de connaissance sur le capteur utilisé,
- les propriétés des surfaces étudiées,
- la géométrie de la scène etc.

Sans avoir l'intention d'effectuer une revue exhaustive des différentes méthodes existantes, voici présentés de manière générale les principales approches de reconstruction et concepts correspondant rencontrés en Vision par Ordinateur :

1.3.3.1 Reconstruction stéréo dense

On regroupe sous cette appellation toutes les méthodes de reconstruction 3D basées sur des algorithmes de mise en correspondance dense entre images.

Tout d'abord, un bref rappel de ce qu'est *la mise en correspondance* est nécessaire.

Considérons au moins deux images d'une même scène 3D prises de deux points de vues différents. Le problème de mise en correspondance consiste à identifier, pour un élément d'une scène 3D projeté dans une image, la projection de ce même élément de la scène dans l'autre ou les autres images (Figure 1-13).

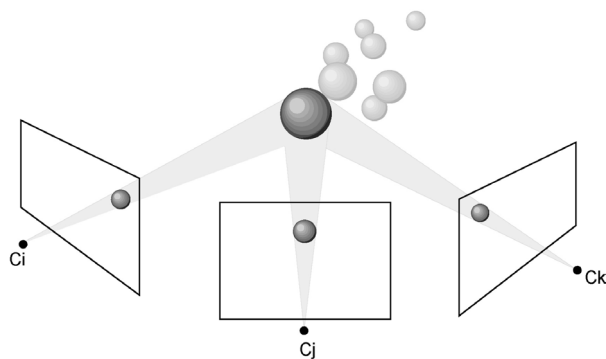


FIGURE 1-13 : MISE EN CORRESPONDANCE DANS 3 IMAGES D'UNE FIGURE QUELCONQUE.

La mise en correspondance peut s'effectuer sur des points, des primitives géométriques telles que des coins, des droites ou bien sur l'information radiométrique contenue dans des sous-ensembles de l'image (fenêtres). Elle peut concerner des données denses, comme la totalité d'une image, ou des données éparses (information radiométriques ou primitives géométriques). Ainsi, deux grands types d'algorithmes apparaissent dans la littérature selon l'information sur laquelle est basée la mise en correspondance : les algorithmes basés sur la mise en correspondance par corrélation (pixels) et les algorithmes d'appariement de figures éparses (primitives géométriques). Dans le premier cas, une mesure de similarité quantifiant la qualité des correspondances est effectuée et maximisée. Le critère de corrélation peut prendre différentes formes selon les méthodes rencontrées. Dans le deuxième cas, la qualité de la mise en correspondance est en général basée sur la quantification de certaines propriétés des figures examinées. Cette mise en correspondance a longtemps constitué une tâche laborieuse en photogrammétrie car effectuée manuellement. La difficulté de la tâche réside aujourd'hui dans son automatisation informatique.

La mise en correspondance est une étape que l'on ne retrouve pas seulement dans les méthodes de stéréo dense évoquées dans ce paragraphe, mais dans la plupart des méthodes de reconstruction 3D (vois paragraphes suivants). Elle constitue l'un des points durs de la reconstruction. En effet, c'est sur l'exactitude de la mise en correspondance que repose la précision du modèle 3D reconstruit.

Les méthodes de stéréo dense consistent à mettre en correspondance des couples de vues ou N vues simultanément de manière dense. Les images sont celles d'une scène statique ou d'une scène en mouvement capturée de manière instantanée par un ensemble de capteurs, comme c'est le cas dans l'approche proposée par Narayanan, Rander et Kanade (Narayanan et al., 1998). La mise en correspondance permet alors d'établir des cartes de disparités, une disparité étant la différence de position de points homologues dans leur image respective (Figure 1-10). La disparité est à la fois fonction de la position du point 3D de la scène et du modèle du capteur (paramètres internes et externes, voir chapitre 2, paragraphe 2.2). Ainsi, la connaissance des paramètres de caméra permet la **triangulation** des points homologues fournissant l'information directe de profondeur. Les cartes de disparités deviennent des cartes de profondeur. Un modèle 3D global peut alors être extrait à partir de l'ensemble des informations représentées par toutes les cartes de profondeurs calculées.

Dans la méthode proposée par Narayanan, Rander et Kanade (Narayanan et al., 1998), la reconstruction ne correspond pas à un modèle 3D global, mais à des modèles locaux appelés Visible Surface Mode (VSM). Chaque modèle local résulte du maillage 3D d'une carte de profondeur et ne rend compte par conséquent que d'une partie de la scène 3D réelle. La création de vues de synthèse d'un tel modèle ne sera satisfaisante que si le nouveau point de vue est proche de celui ayant servi à la reconstruction. D'autres auteurs se sont alors attachés à estimer un modèle 3D global, en procédant à une fusion des modèles locaux (VSM) pour aboutir à un modèle de surface complet (Curless and Levoy, 1996), ou, comme Chen et Medioni (Chen and Medioni, 1999, en effectuant une fusion de surface de disparités calculées pour chaque paire d'images, dans une approche différente

où la reconstruction par corrélation dense est formulée comme un problème d'extraction de surface à partir d'un volume de disparité.

Il est bon de souligner ici que les méthodes de corrélation dense sont les méthodes classiquement utilisées pour générer des MNT à partir de vues aériennes ou d'images satellites. La reconstruction par mise en correspondance dense dans les images présente en effet divers avantages pour ce type d'images et ce mode d'acquisition des vues (axe optique quasi-vertical). Les surfaces naturelles présentent en effet une texture généralement riche, nécessaire à une mise en correspondance dense. Les approches reposant sur des mises en correspondance éparses de primitives géométriques sont exclues car rares sont les figures naturelles permettant la détection de primitives géométriques particulières de type coins, droites ou plans. La mise en correspondance dense permet également dans ce cas de s'affranchir d'une connaissance à priori de la scène à reconstruire. En ce qui concerne le problème du calibrage du capteur, les techniques employées disposent en général des paramètres internes calculés de manière précise en laboratoire. La géométrie externe des vues est habituellement soit mesurée par des systèmes de navigation embarqués couplant GPS (donnant la position du capteur) et centrale inertielle (donnant l'orientation du capteur), ou peut être estimée selon des techniques photogrammétriques, de type aérotriangulation par faisceaux, ayant fait leur preuve (Kraus et al., 1998). Notons qu'il existe également des approches récentes de reconstruction dense prenant en compte des vues aériennes obliques (Duplaquet et al., 2001).

1.3.3.2 Structure à partir du mouvement (Structure from Motion)

Ces méthodes de reconstruction s'attachent à recouvrir la structure 3D d'une scène à partir du mouvement du capteur relatif à cette scène. La plupart des méthodes rencontrées utilisent une séquence d'images généralement prises à des points de vues relativement proches, comme c'est le cas lors d'une acquisition vidéo. Cependant, la contrainte d'espacement restreint entre les vues successives n'est ni explicitement ni implicitement contenue dans la définition. Il existe d'ailleurs des méthodes qui prennent en compte des vues relativement éloignées (Lhuillier and Quan, 2002). On fait la distinction entre les approches où le mouvement du capteur est initialement connu et qui ont montré depuis longtemps leur efficacité (Harris and Pike, 1987 ou Zhang and Faugeras, 1992), et les approches où à la fois structure 3D et calibrage capteur (paramètres internes et/ou externes) sont à déterminer à partir des informations image seules (Fitzgibbon and Zisserman, 1998, Zisserman et al., 1999, Han and Kanade, 2000). Ces dernières constituent actuellement une part active de la recherche en Vision par Ordinateur. Les deux problèmes traités dans ces méthodes sont la mise en correspondance et l'auto-calibrage (voir chapitre 2 paragraphe 2.2.1 pour l'auto-calibrage).

Une mise en correspondance de données éparses mais fiables dans une séquence d'images permet en général de calibrer le capteur et de reconstruire les primitives éparses dans un espace projectif. Une telle reconstruction n'est pas satisfaisante dans le sens où elle diffère largement de la scène réelle telle que perçue et interprétée par le cerveau humain. Le passage à un calibrage et une

reconstruction métrique ou euclidienne est possible grâce à l'ajout de certaines contraintes concernant les paramètres internes du capteur. D'autres contraintes relatives à la géométrie de la scène ou concernant le mouvement du capteur permettent ce passage (voir les méthodes semi-automatiques évoquées plus loin), mais ne conviennent pas au problème tel qu'il est posé ici, c'est-à-dire la reconstruction d'une scène inconnue à partir d'une séquence de vues (ex : vidéo) acquise sans contraintes particulières.

Certaines approches (Zisserman et al., 1999, Fitzgibbon et al., 1998) utilisent alors cette reconstruction métrique et/ou euclidienne éparse pour générer un modèle 3D texturé en faisant passer des plans par les primitives reconstruites existantes. D'autres (Koch et al., 1998) vont procéder à une mise en correspondance dense des paires d'images composant la séquence vidéo, telles que décrites à la section précédente, permettant alors une reconstruction surfacique dense par combinaison de l'ensemble des informations de profondeurs obtenues. Cette mise en correspondance dense est simplifiée par le faible déplacement 3D entre les vues successives, comparativement aux systèmes cités au paragraphe précédent, utilisant des images prises de point de vues très différents (Naranayan et al., 1998).

Des résultats probants ont été obtenus sur différents types de scènes, notamment sur des scènes architecturales et quelques paysages (Pollefeys et al., 1999). La contrainte majeure pour ce type de méthode réside peut-être dans l'utilisation, pour la majorité des cas, de vues spatialement très proches (Debeve et al., 1996), se traduisant par la nécessité d'un nombre important de vues pour reconstruire complètement une scène 3D.

1.3.3.3 Déformation de modèles de surface 3D

L'idée principale exploitée par ces méthodes de reconstruction est celle de la déformation d'un modèle 3D initial représentant la scène ou l'objet à reconstruire. Soulignons ici qu'il s'agit bel et bien de méthodes de reconstruction, et non de méthodes d'extraction de surfaces à partir de données 3D déjà existantes, à propos desquelles la littérature abonde. Le modèle initial et sa déformation sont abordés différemment selon les approches rencontrées dans la littérature. D'une manière générale, le modèle initial peut être généré en utilisant une connaissance a priori de la scène, ou par mise en correspondance dense dans les images (Fua and Leclerc, 1995, Fua, 1997, Fua and Leclerc, 1998), telle que vue dans la section Reconstruction Stéréo Dense plus haut. La déformation du modèle quant à elle repose en général sur un critère basé sur la cohérence des projections du modèle 3D dans les diverses images.

Ainsi, Fua et Leclerc (Fua et al., 1995) déforment une surface initiale maillée par minimisation d'une fonction objective basée sur la projection du modèle 3D dans les images. Cette fonction combine plusieurs informations des N images utilisées. Elle est composée de trois termes pondérés qui sont : un terme de lissage mesurant la différence entre la surface maillée et sa forme nominale, un terme de corrélation multi-images reposant sur l'intensité lumineuse, et enfin un terme prenant en compte la variation de l'albedo (rapport entre la lumière émise et la lumière incidente) de la surface permettant

une corrélation dans des zones de l'image faiblement texturées. Ce dernier terme nécessite la connaissance de la direction de la source lumineuse éclairant la scène. Une version plus complète de cette approche (Fua et al., 1998) consiste à estimer en plus la géométrie extrinsèque du dispositif d'acquisition lors du processus, ce qui permet l'application de la méthode aux problèmes de calibrage d'images stéréo, de calcul de pose (position et orientation) de nouvelles vues et du suivi d'objets déformables. Des scènes complexes de type visages ou paysages vus d'avion (vues à axe optique vertical) ont fait l'objet de reconstructions réussies.

Un autre exemple est l'utilisation d'un modèle de particules permettant de reconstruire des scènes complexes, comme le propose Fua (Fua, 1997). Cette méthode permet de se passer de toute information sur la topologie de la surface à reconstruire, ce qui est un avantage considérable concernant la reconstruction de scènes complexes, notamment celles composées de plusieurs objets. L'approche décrite précédemment sied par exemple mal à ce type de scènes car dans ce cas, il faudrait supposer que les données 3D servant à initialiser les modèles 3D soient aisément séparables, ce qui constitue une hypothèse trop forte. Dans cette approche, une mise en correspondance dense entre paires stéréo permet dans un premier temps de générer un nuage de points 3D, qui va ensuite être transformé en un ensemble de particules orientées indépendantes, telles que définies par Szeliski et al. (Szeliski et al., 1993). Une deuxième étape consiste à optimiser leur localisation en minimisant une fonction composée de deux termes : l'un correspond à une corrélation multi-images de l'intensité lumineuse, l'autre est un terme de régularisation qui tend à renforcer la cohérence entre particules voisines. Une étape finale de regroupement des particules en surfaces globales est réalisée.

D'autres approches existent, comme par exemple les méthodes d'ensemble de niveaux dans lesquelles un ensemble d'équations différentielles partielles, établi à partir des équations d'Euler-Lagrange selon un critère de correspondance multi-vues, est utilisé pour faire évoluer une surface initiale. Cette surface correspond à une sphère dans les exemples proposés par Faugeras et Keriven (Faugeras and Keriven, 1998).

Nous pouvons introduire ici la notion de **reconstruction centrée Objet**, comme décrite par Fua et Leclerc (Fua et al., 1995), qui se distingue des **reconstructions** dites **centrées Image**. Les approches de reconstruction par déformation de modèles 3D initiaux sont des reconstructions centrées Objet. Une reconstruction centrée Objet repose sur une description 3D de la scène à reconstruire. Cette description 3D de la scène est le point de départ de la reconstruction. Une reconstruction centrée Image est typiquement une reconstruction par stéréo dense s'appuyant uniquement sur une mise en correspondance entre images. Nous reviendrons plus tard (section 1.3.4) sur les avantages d'une représentation centrée Objet. Une des principales limites inhérentes aux méthodes centrées Image réside dans leur forte dépendance aux effets liés au point de vue, notamment le problème des occlusions, c'est-à-dire des parties cachées des surfaces reconstruites liées à la complexité d'une surface ou à la présence de plusieurs objets dans une scène. En effet, dans la réalité les surfaces se chevauchent fréquemment, et une partie d'un objet peut alors n'être visible que dans une seule image, impliquant qu'aucune mise en correspondance ne peut être faite pour cette partie de l'objet. Le modèle 3D directement issu de la reconstruction dense sera alors

incomplet et présentera des « trous ». Une reconstruction centrée Objet permet de gérer correctement les occlusions de part la description initiale d'un modèle 3D indépendante du point de vue (Seitz and Dyer, 1999). Une reconstruction centrée objet, outre le traitement des occlusions, permet de combiner des informations à la fois géométriques et radiométriques, mais permet également d'intégrer les informations d'un grand nombre d'images prises de points de vues très différents.

1.3.3.4 Approches volumiques

Les approches de reconstruction volumique reposent sur une description volumique de la scène à reconstruire et sont alors par définition des représentations centrées Objet, semblablement aux approches de reconstruction par déformation de modèles de surfaces. L'espace 3D est en général défini de manière discrète comme étant composé de voxels, petites entités volumiques dont l'ensemble forme un cube contenant la scène, appelé l'espace voxel.

Ce type d'approche permet d'outrepasser un certain nombre de problèmes posés par les méthodes de mise en correspondance dense et autres méthodes centrées Image. Ces problèmes sont détaillés dans le paragraphe 1.3.4 « Problèmes majeurs soulevés ». Pour résumer, la reconstruction 3D basée sur une modélisation volumique de la scène permet l'utilisation d'un grand nombre d'images prises de points de vue très différents, mais permet également la gestion correcte des occlusions. Dans la plupart des méthodes proposées, le calibrage du capteur est supposé connu initialement.

Le principe de reconstruction est celui d'un raffinement progressif du volume discret initial de manière à satisfaire un critère de cohérence de projection des voxels dans les images. Chaque voxel est en général classé selon une division binaire (transparent ou opaque), ternaire (transparent, opaque, invisible) ou encore se voit attribué une valeur d'opacité selon les méthodes. Le critère de cohérence se réfère à la notion de *photo-consistance* (Kutulakos and Seitz, 1999, Seitz et al., 1999, Leclerc et al., 2000) : Soit une série de photos donnée d'une scène 3D. Une reconstruction 3D valide de cette scène permet de générer des vues virtuelles du modèle 3D identiques aux vues réelles initiales, si les paramètres du capteur sont connus. Dans ce cas, on dit qu'il y a consistance de reproduction images (image-reproduction consistency en anglais). Il faut noter que la comparaison 2D/2D des images virtuelles et réelles dépend également de la qualité et des caractéristiques du processus de rendu du modèle 3D. La consistance de reproduction image ou encore photo-consistance est directement liée à une série de données particulières, et donc un modèle 3D valide satisfaisant le test de consistance de reproduction image n'est qu'une solution possible parmi d'autres, que l'on considère étant la meilleure reconstruction possible sans informations supplémentaires. La notion de photo-consistance se rapproche de la notion d'auto-consistance dont il est question dans les approches par corrélation dense (Leclerc et al., 2000). Cette dernière peut servir de support à l'évaluation des algorithmes de stéréo dense en s'appuyant sur la consistance des correspondances entre images qui ont servi à construire un modèle 3D. A contrario, la notion de photo-consistance use de la démarche inverse qui

consiste en la vérification d'un modèle 3D basée sur la consistance de sa projection dans une série d'images données.

Voici les principales approches de reconstruction volumique (revue complète dans Dyer, 2001, ou Slabaugh et al., 2001 :

Reconstruction à partir de silhouettes

La reconstruction est basée dans ce cas sur l'utilisation de la silhouette d'un objet. Cela suppose que l'objet se distingue aisément du fond de l'image, ce qui est une limite importante de la méthode. En général, une série d'images est acquise autour de l'objet à reconstruire. Chaque image est alors transformée en image silhouette, c'est-à-dire une image binaire où les pixels se divisent en pixels d'avant ou d'arrière plan selon qu'ils appartiennent ou non à l'objet devant être reconstruit (Figure 1-14). Cette binarisation des images équivaut à un processus de segmentation. Connaissant les paramètres du capteur, le contour apparent (Figure 1-14) de l'objet dans l'image se reprojette dans l'espace selon un cône généralisé englobant la silhouette de l'objet. La reprojette des contours de toutes les images correspond à un ensemble de cônes semi-infinis dont l'intersection dans l'espace définit un volume contenant la scène à reconstruire (Figure 1-15), également définit comme le Visual Hull en anglais. Ce volume est une approximation de l'objet reconstruit dépendant fortement de la position et du nombre de vues employées, mais aussi de la complexité de l'objet. En effet, les concavités d'un objet ne sont pas mises en évidence par une telle configuration géométrique (Figure 1-15), ce qui constitue une autre limite majeure de la reconstruction 3D à partir de silhouettes. Un des avantages cependant est que la reconstruction peut se faire pour des objets peu texturés car seule la silhouette de l'objet est utilisée.

Le modèle volumique de l'objet ou Visual Hull est souvent implémenté et représenté sous forme de voxels, bien que certains auteurs utilisent des surfaces quadratiques locales (Boyer and Berger, 1997, Cipolla and Blake, 1992) ou des splines (Sullivan and Ponce, 1998) en s'appuyant sur une hypothèse de lissage concernant la surface à reconstruire.

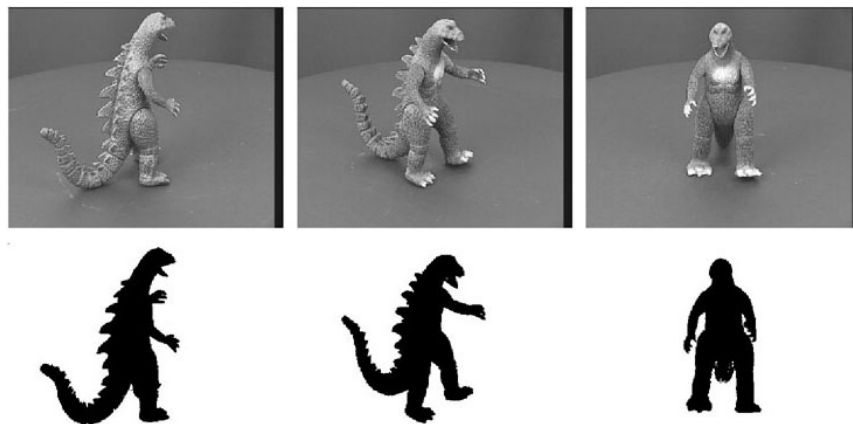


FIGURE 1-14 : EXEMPLE D'IMAGE SILHOUETTE EXTRAIT DE CROSS AND ZISSERMAN, 2000. UNE QUANTITÉ IMPORTANTE D'INFORMATIONS EST APPORTÉE PAR LA BINARISATION D'IMAGE.

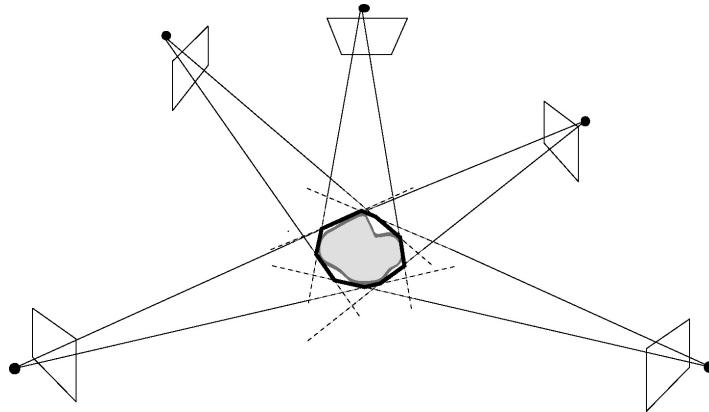


FIGURE 1-15 : REPRÉSENTATION 2D DU VISUAL HULL : VOLUME CONTENANT LA SCÈNE À RECONSTRUIRE. IL EST SCHÉMATISÉ PAR UN POLYGONE (NOIR) ENGLOBANT LA SURFACE RÉELLE À RECONSTRUIRE.

Le modèle final, dont la résolution n'est pas forcément uniforme (voxels de différentes tailles) est obtenu en classant les voxels de l'espace selon qu'ils sont à l'intérieur, à l'extérieur ou à la surface de l'objet (Figure 1-16). Une autre implémentation, dont le principal avantage est la rapidité, est celle basée sur les octrees. Un octree est une structure de données en arbre basée sur une cellule qui se subdivise en 8 cellules filles, représentant chacune un cube dans l'espace physique et occupant un octant de la cellule mère. Une classification des pixels selon le modèle volumétrique approché (Visual Hull) est effectuée sur une représentation 3D initiale de faible résolution. Chaque voxel appartenant à la surface de l'objet est alors subdivisé de manière régulière en 8 sous-unités et une classification est à nouveau réalisée, ceci jusqu'à obtention de la résolution désirée.

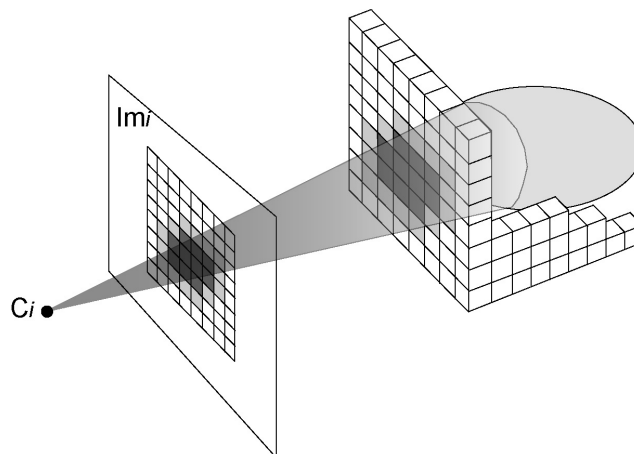


FIGURE 1-16 : ÉCHANTILLONNAGE DE L'ESPACE 3D ET CLASSIFICATION DES VOXELS DE L'ESPACE SELON UNE VUE Im . D'APRÈS CROSS ET ZISSERMAN (CROSS ET AL., 2000). TROIS TYPES DE VOXELS SONT REPRÉSENTÉS EN 2D : EN BLANC L'ESPACE VIDE, EN GRIS CLAIR LES VOXELS DE SURFACE, EN GRIS SOMBRE LES VOXELS INTÉRIEURS.

Reconstructions reposant sur le principe de photo-consistance : Colorisation de voxels (Voxel Coloring) et sculpture de l'espace (Space carving)

Comparativement à l'approche précédente, cette méthode s'appuie sur l'information de texture des images. Le recouvrement de la scène 3D est réalisé en appliquant la propriété de photo-consistance pour des surfaces supposées lambertiennes (voir chapitre 2 paragraphe 2.3.1 pour plus de détails sur la réflexion lambertienne). Le principe de ce type de reconstruction est le suivant : les voxels de l'espace sont projetés dans les différentes images de la scène. Une couleur caractérise chaque projection. L'ensemble des projections correspond à une mise en correspondance et une comparaison de la couleur des points correspondants visibles est effectuée. La reconstruction consiste alors à éliminer les voxels dont les projections dans les images ne sont pas cohérentes ou photo consistantes (voir définition de la notion de photo-consistance en début de paragraphe). Seules les projections non occultées sont prises en compte dans ce processus. Cela est possible grâce à la réalisation d'une ordonnance des voxels selon leur visibilité. Chacun des voxels restant possède alors une couleur issue de sa projection dans les images.

Les variations trouvées dans les approches concernent en général la manière de classer les voxels selon leur visibilité (balayage de la scène selon un ou plusieurs plans avec une configuration spatiale des caméras particulière ou générale) et la manière d'étiqueter les voxels à l'issue du test de photo-consistance. En considérant par exemple un étiquetage binaire des voxels (transparent ou opaque), deux manières de les classer peuvent être envisagées: une première consiste à considérer l'espace discret 3D comme étant transparent et à opacifier les voxels photo-consistants. Cette option est utilisée dans un algorithme répandu appelé Voxel Coloring en anglais ou Colorisation de voxels (Seitz et al., 1999). L'autre façon de procéder est de considérer au contraire l'espace voxel comme étant opaque, et de désigner un voxel comme étant transparent s'il n'est pas photo-consistant. C'est ici l'implémentation utilisée par Kutulakos et Seitz (Kutulakos et al., 1999) dans leur approche de Space Carving, littéralement sculpture de l'espace. Des résultats photoréalistes de haute qualité sont obtenus par ces méthodes (Kutulakos et al., 1999, Dyer, 2001).

Certaines méthodes de reconstruction volumique combinent les deux approches décrites, alliant ainsi l'information fournie par les contours apparents d'un objet à l'information de texture présentée par la surface d'un objet (Cross et al., 2000).

1.3.3.5 Méthodes interactives

Ces méthodes sont aussi connues sous le nom de méthodes semi-automatiques. Elles reposent sur l'intervention d'un utilisateur au niveau des étapes délicates du problème de la reconstruction, notamment en ce qui concerne la mise en correspondance de primitives entre les images. Cela permet d'obtenir en général un modèle 3D répondant à un besoin de haute qualité de réalisme en minimisant un travail automatique pas toujours très fiable. Le nombre d'images est en général réduit afin de minimiser le temps d'intervention de l'utilisateur. De telles méthodes de reconstruction ont déjà montré leur efficacité par des résultats particulièrement convaincants (Debeve et al., 1996).

Ces méthodes sont particulièrement bien adaptées à la reconstruction de scènes urbaines, où la présence de bâtiments et divers édifices architecturaux constitue une source parfaite de primitives géométriques détectables dans les images, pouvant être mises en correspondance manuellement. Les figures particulières que sont les droites parallèles et orthogonales dans ce type de scène, mais aussi les formes géométriques simples que l'on y retrouve (cubes, prismes...) constituent autant de contraintes supplémentaires permettant de recouvrir une reconstruction satisfaisante (génération de vues de synthèses, mesure du modèle 3D) avec peu ou sans informations de calibrage initialement. Ainsi les approches rencontrées peuvent prendre en compte des séquences d'images soit calibrées intrinsèquement (i.e. « fortement » calibrées ou *strongly calibrated*, comme c'est le cas pour Debevec et al., 1996 ou Shum et al., 1998), soit non calibrées (Becker and Bove, 1995, Faugeras et al., 1995). Il existe également des approches prenant en compte des modèles de caméras complets en début de procédure (Noronha and Nevatia, 1997).

L'intérêt d'aller plus avant dans la description de ce type de méthodes est limité étant donné qu'elles ne sont pas des candidats potentiels pour notre application spécifique en volcanologie. Les scènes auxquelles nous sommes confronté ne contiennent en effet que très peu, voire pas du tout, des primitives géométriques telles que décrites ci-dessus.

Comme il a été signalé en début de paragraphe, la liste des méthodes présentées n'est pas exhaustive, mais les principaux types y sont répertoriés. Il faut signaler qu'il existe cependant d'autres types de méthodes, moins répandues, comme par exemple les méthodes de reconstruction par couches (Baker et al., 1998).

1.3.4 PROBLÈMES MAJEURS SOULEVÉS

Les principales difficultés rencontrées lors de la reconstruction 3D d'une scène sont en général relatives à la mise en correspondance et au calibrage du capteur (paramètres internes et géométrie extrinsèque des vues). Un autre problème rencontré, mais de second ordre par rapport aux deux cités précédemment, concerne la précision de la reconstruction 3D effectuée.

Mise en correspondance

Un rappel de ce qu'est la mise en correspondance a été fait dans la section « Reconstruction stéréo dense » du paragraphe précédent. Il s'agit en effet de trouver dans deux ou plusieurs images les projections correspondantes à un même élément 3D d'une scène.

La mise en correspondance est une étape nécessaire à la reconstruction 3D et constitue une tâche difficile. Seules les méthodes de reconstruction actives peuvent s'affranchir de ce problème. De nombreuses configurations mènent en effet à la génération de fausses correspondances ou à l'impossibilité d'effectuer localement une mise en correspondance (exemple des occlusions), ce qui constitue alors une source de perturbation importante pour la reconstruction 3D. Les fausses correspondances par exemple perturbent gravement la reconstruction 3D finale car une minimisation

au sens des moindres carrés est fréquemment employée pour la mise en correspondance. Les erreurs pénalisent alors le critère en χ^2 .

En général, les principales difficultés rencontrées dans la mise en correspondance, toutes méthodes de reconstruction confondues, concernent :

- Les zones faiblement texturées (uniformes) ou à texture répétitive.
- La déformation de la texture provoquée par un espacement important des vues.
- Les variations de radiométrie entre images liées à une variation d'éclairage de la scène.
- Les zones occultées dans les images dues à la complexité de surface d'un objet ou à la complexité de composition de la scène (plusieurs objets distincts).

Une grande partie des efforts de la recherche s'est concentrée sur la simplification de ce problème de mise en correspondance, et par-là même de nouvelles méthodes ont été développées.

Parmi les simplifications les plus courantes proposées dans la littérature, on retrouve :

- Quand elle est connue, l'utilisation de la géométrie épipolaire, et plus généralement de la géométrie multi-vues (contraintes trilineaires par exemple), facilite la recherche des correspondances dans les images. En effet, la contrainte épipolaire permet de réduire l'espace de recherche de la correspondance d'un point m_1 d'une image Im_1 à la ligne épipolaire dans l'image Im_2 . Une telle simplification est par exemple utilisée par Koch et al. (Koch et al., 1998), qui proposent une approche de reconstruction de type structure à partir du mouvement (Structure from Motion). Ce type de simplification est également souvent employé dans les méthodes de stéréo dense. Une rectification des images permettant l'exploitation plus aisée de la contrainte épipolaire est souvent réalisée. La rectification d'une image consiste à placer virtuellement les images dans une configuration stéréo standard dans laquelle les lignes épipolaires sont alignées horizontalement. Cela permet en effet de réduire l'espace de recherche à une seule dimension, représentée par les lignes d'une image. Les images ainsi rectifiées sont appelées **ortho-images**.
- Une simplification du problème consiste, pour certaines méthodes, à imposer tout simplement une contrainte sur l'espacement des prises de vue. C'est le cas de nombreuses méthodes de type structure à partir du mouvement. Le fait d'avoir des vues rapprochées va en effet limiter la distorsion de la projection de la scène d'une image à l'autre, ainsi que limiter les occlusions quand la surface à reconstruire est complexe.
- Une autre simplification consiste à filtrer les données initiales ou finales. Ainsi le filtrage des images initiales peut par exemple permettre de s'affranchir des variations d'éclairage entre les images (Fua et al., 1995, Poggio et al., 1985, Barnard, 1989), ou encore le filtrage de cartes de profondeur peut permettre d'atténuer les fausses correspondances (Fua et al., 1995).
- Une mise en correspondance bi-directionnelle constitue également une approche simplificatrice (Cox et al., 1996).

- Des approches de mise en correspondance hiérarchique permettent aussi de simplifier le problème (Yang et al., 1993, van Meerbergen et al., 2002). La mise en correspondance peut par exemple être effectuée sur des zones de l'image de plus en plus petites ou des images de différentes résolutions (Moravec, 1977). Ces approches peuvent reposer sur le filtrage d'images évoqué précédemment.
- L'intervention de l'utilisateur permet aussi de simplifier la mise en correspondance, comme c'est le cas proposé par les méthodes interactives.
- L'utilisation d'une description 3D de la scène à reconstruire par les méthodes de reconstruction dites centrées Objet est également l'une des approches majeures de simplification du problème de la mise en correspondance. Le principal avantage de ces méthodes est la gestion correcte des occultations image, ce qui n'est pas le cas des représentations centrées Image. La projection d'un modèle 3D dans les images permet en effet de définir quelles parties d'un objet sont visibles ou non dans une image, autorisant ainsi à prendre en charge de manière correcte les occlusions dans le processus de reconstruction. L'utilisation d'un modèle 3D va également permettre de lever partiellement la contrainte concernant l'espacement restreint des vues, et permet d'éviter le problème de la maintenance des correspondances sur des séquences de vues parfois très importantes. D'autres difficultés, inhérentes aux représentations centrées Image, mais ne concernant pas toujours directement la mise en correspondance, existent et peuvent être rappelées (Fua, 1997, Dyer, 2001). L'une d'elles est la fusion des données. En effet, plusieurs modèles partiels liés à des associations de vues (couples, triplets, quadruplets de vues) sont en général créés et doivent être fusionnés pour obtenir un modèle 3D complet. Un autre problème est celui de la segmentation lorsque la méthode (reconstruction stéréo dense par exemple) conduit à la production d'un nuage 3D dense d'une scène pouvant contenir plusieurs objets. Il s'agit alors de reconnaître différents objets dans la scène par regroupement cohérent des points 3D reconstruits. Un autre inconvénient de ces méthodes est la nécessité de faire appel à une surface paramétrée pour obtenir au final une reconstruction dense quand la mise en correspondance effectuée est éparse.

À l'exception des approches centrées Objet, toutes les simplifications décrites ci-dessus visent à réduire la probabilité d'établissement de fausses correspondances.

La mise en correspondance est également une difficulté majeure dans le sens où elle englobe d'autres problèmes majeurs comme par exemple l'optimisation de données ou l'élimination de résultats erronés.

Calibrage du capteur

Le calibrage du capteur constitue l'un des points délicats à prendre en compte lors du processus de reconstruction 3D. Le recouvrement d'une scène 3D nécessite en effet l'estimation explicite ou implicite des paramètres internes et externes du capteur, permettant d'établir les relations mathématiques entre l'espace 2D et l'espace 3D. Il ne s'agit toujours pas dans cette section de rentrer dans les détails du calibrage d'un capteur, mais simplement d'éclaircir les relations existantes entre le

problème du calibrage et la reconstruction 3D d'une scène, et d'introduire quelques termes couramment rencontrés dans la littérature.

On peut en effet distinguer trois degrés de connaissance concernant le calibrage d'un capteur, exprimant une difficulté de résolution croissante du problème de reconstruction 3D associé. Le cas le plus simple est celui où les paramètres internes et externes (voir chapitre 2 paragraphe 2.2 pour plus de détails) sont connus. Dans ce cas la relation 2D / 3D est complètement déterminée et seuls les problèmes liés à la mise en correspondance interviennent alors dans le processus de reconstruction. Le **calibrage** est qualifié de « **total** ». De nombreuses méthodes de reconstruction sont basées sur un calibrage total du capteur. Ce sera d'ailleurs le cas de la méthode de reconstruction présentée dans ce mémoire. En ce qui concerne les reconstructions par corrélation dense, le calibrage total permet de calculer directement et sans ambiguïté l'information 3D à partir de la triangulation des correspondances (passage d'une carte de disparité à une carte de profondeur pour un couple d'images). Le deuxième cas, correspondant à un **calibrage** dit « **fort** », est celui où seuls les paramètres internes du capteur sont connus. Sans la position et l'orientation du capteur, qui permettent de calculer un facteur d'échelle nécessaire à une reconstruction euclidienne, seule une reconstruction métrique est possible (paragraphe 1.2.2). Les paramètres externes peuvent être calculés lors du processus de reconstruction 3D ou des contraintes supplémentaires sur la scène 3D peuvent être apportées si une reconstruction métrique n'est pas satisfaisante dans le cadre des objectifs visés. Enfin, le dernier cas est celui du **calibrage** « **faible** » pour lequel aucune information sur le capteur n'est disponible. Seule une reconstruction projective est alors possible. Rares sont les méthodes de reconstruction 3D qui se placent dans ce cas de figure, qui constitue actuellement l'un des principaux axes de recherche en Vision par Ordinateur.

1.4 POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX

La méthode de reconstruction présentée dans ce mémoire est basée sur une approche photogrammétrique utilisant des photos numériques (photogrammétrie numérique ou vidéogrammétrie). L'approche présentée diffère des techniques de photogrammétrie actuellement utilisées pour la création de MNT en volcanologie, employant des images satellites ou aériennes, et qui se basent classiquement sur des méthodes de corrélation dense.

La méthode s'articule selon deux étapes principales qui sont une étape de calibrage du capteur, et une étape de reconstruction 3D de la scène étudiée.

De nombreuses manières d'aborder le problème de la reconstruction sont, on l'a vu, possibles. Parmi les principales méthodes citées dans la section 1.3.3 « Les différentes approches possibles », toutes constituent des voies envisageables pour une application en volcanologie, excepté les méthodes interactives qui concernent des environnements généralement urbains. Cependant, le choix de l'approche proposée, à la fois guidé par les outils de reconstruction récemment développés en Vision

par Ordinateur et les exigences du cadre d'application, s'est porté sur la déformation d'un modèle 3D générique, avec une hypothèse initiale de calibrage fort.

Rappelons tout d'abord les principales attentes, déjà formulées au paragraphe 1.1.2 « Une nouvelle approche proposée », auxquelles la méthode proposée a pour objectif de répondre :

- (1) Reconstruction 3D précise de la scène étudiée.
- (2) Facilité de mise en œuvre et flexibilité concernant l'acquisition des vues et le calibrage du capteur.
- (3) Gestion des morphologies de géométrie complexe, notamment des figures quasi-verticales.
- (4) Coût financier modeste.

Relativement à ces attentes et aux outils de Vision par Ordinateur présentés précédemment, voici comment se positionnent nos travaux :

1. Tout d'abord, le choix d'une méthode de reconstruction passive s'est imposé rapidement. En effet, malgré le développement et l'utilisation de la méthode en laboratoire, qui auraient pu conduire au choix d'une méthode active, les perspectives d'application de celle-ci sur le terrain ont écarté cette voie. D'une part, en effet, les méthodes de reconstruction basées sur un contrôle de la lumière ne sont pas envisageables sur le terrain. D'autre part, l'un des objectifs initialement fixé dans cette étude est la reconstruction à partir d'images, or les techniques utilisant un laser, bien que pouvant être mises en œuvre sur le terrain, sont des techniques de mesures directes.
2. Ensuite, l'utilisation de plusieurs vues d'une même scène permet de répondre à l'exigence de précision attendue de la reconstruction. La redondance d'information pour une même surface promet en effet de conduire à une meilleure précision que dans le cas de l'utilisation d'un couple stéréoscopique.
3. Le choix d'une méthode centrée Objet nous est ensuite apparu être une solution intéressante dans le cadre des applications envisagées. Ce type de méthode permet en effet, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, de simplifier le problème majeur de la mise en correspondance et de s'affranchir de nombreuses difficultés qui lui sont liées. Outre cet aspect théorique, les conditions d'application de la méthode permettent l'utilisation d'une description 3D initiale de la scène à reconstruire. Dans la majorité des cas, le volcanologue dispose d'informations sur la scène à reconstruire. En effet, en laboratoire, le type d'expérience réalisé et sa géométrie sont connus, et permettent une description simplifiée de l'objet à reconstruire constituant un modèle 3D initial. Si une application de terrain est envisagée, la possibilité de disposer d'un MNT grossier de la région d'étude, ou même d'approximer sa morphologie par une géométrie simple est tout à fait envisageable. Dans tous les cas, une implication minimale du volcanologue est nécessaire en début de processus. Une information plus juste et ciblée est attendue de cet apport initial de la connaissance du volcanologue.
4. Le choix d'un calibrage fort a été réalisé pour deux principales raisons : premièrement, l'un de nos objectifs concerne la précision de reconstruction. Les trois degrés de connaissance concernant le calibrage, et précédemment évoqués (total, fort et faible), sont en général étroitement liés à la précision attendue de la reconstruction, et donc aux objectifs initiaux de l'application visée. Ainsi,

un calibrage faible n'est pas une hypothèse initiale idéale lorsqu'il s'agit de reconstruire une scène de manière très précise (application en métrologie industrielle par exemple). Concernant les travaux présentés dans ce mémoire, que ce soit dans le cadre d'une application en laboratoire ou sur le terrain, la surface reconstruite doit être suffisamment précise pour permettre une analyse fine de sa topologie et des déformations possibles qui lui sont associées. Une deuxième raison à ce choix est la possibilité de calibrage fort offerte par le contrôle partiel de l'environnement d'acquisition des vues, notamment en laboratoire où est développée la méthode.

5. Enfin, le mode d'acquisition des vues et le matériel utilisé permettent de s'affranchir du problème de mauvaise gestion des reliefs de forte pente, et permet une mise en œuvre simple et flexible, d'adaptant à diverses situations. La méthode est en effet basée sur une acquisition des vues effectuée autour de l'objet à reconstruire (vues obliques), pour laquelle les exigences sont celles d'un recouvrement complet de l'objet et d'une distribution en général relativement homogène des vues. La prise de vue peut être effectuée à main levée depuis le sol, ou de manière aéroportée dans le cas de certaines applications de terrain. Elle est réalisée à l'aide d'un matériel grand public de qualité.

Certains éléments de ce paragraphe, ainsi que des détails supplémentaires concernant le choix de la méthode proposée sont discutés dans le chapitre suivant, entièrement consacré à la méthodologie de l'approche.

2 UNE « NOUVELLE » APPROCHE DE RECONSTRUCTION MULTI- VUES EN VOLCANOLOGIE

2.1 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE EN LABORATOIRE

Le développement de la méthode de reconstruction 3D s'effectue en laboratoire. Les raisons de ce choix sont doubles. Tout d'abord, la technique proposée répond à un besoin de quantification et d'analyse fine de la déformation en volcanologie expérimentale. Elle constitue alors un outil d'analyse à part entière. La deuxième raison réside dans le fait que le laboratoire offre des conditions particulières permettant de simplifier le développement de la technique et de tester cette dernière plus facilement.

2.1.1 UN OUTIL D'ANALYSE ET DE QUANTIFICATION

La volcanologie expérimentale est une discipline regroupant tous type d'expériences, généralement réalisées en laboratoire, concernant les phénomènes volcaniques au sens large. La modélisation analogique rentre dans le cadre de cette discipline, et vise à reproduire des phénomènes naturels en laboratoire, à l'aide d'expériences mettant en jeu des matériaux analogues (sable, silicone, eau, gélatine, billes de verre, farine, plâtre, miel etc....). Un modèle physique et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont en général établis. Le changement d'échelle impliqué par une telle modélisation conduit en général à la réalisation d'un dimensionnement. Celui-ci permet de garantir une similitude du phénomène étudié entre le laboratoire et la nature (Hubbert, 1937, Ramberg, 1981). Une analyse qualitative, parfois complétée par une analyse quantitative, est réalisée au cours de ces expériences. L'aspect quantitatif, même grossier, peut s'avérer extrêmement intéressant et peut parfois constituer l'un des objectifs de l'expérience (Ildefonse et al., 1999). Il est en effet possible que la mesure en laboratoire soit la seule possibilité de mesure existante du phénomène, lorsque celui-ci

n'est pas directement mesurable dans la nature. Lorsque les expériences sont dimensionnées, la quantification du phénomène en laboratoire peut également donner des indications concernant les valeurs des mesures effectuées sur le terrain. Enfin, la quantification est intéressante en tant qu'analyse relative à l'échelle du laboratoire, quand il s'agit d'interpréter les processus étudiés, de comparer, par exemple, plusieurs expériences, et/ou de mettre en évidence une tendance d'évolution d'un paramètre étudié etc.

C'est en cela que la reconstruction tridimensionnelle en volcanologie expérimentale, plus précisément en modélisation analogique, constitue un outil extrêmement intéressant. Elle concerne les expériences dans lesquelles une analyse de la topologie et/ou une analyse cinétique de la déformation sont nécessaires. Ce type d'expériences est largement répandu en volcanologie expérimentale, ainsi qu'en Sciences de la Terre en général (Donnadieu et al., 2003).

L'utilisation de la reconstruction 3D de surfaces à partir d'images en modélisation analogique est extrêmement récente (Donnadieu et al., 2003). La plupart des études rencontrées jusqu'à présent ont utilisé l'image pour cartographier les diverses structures de surface et ont utilisé des coupes des modèles pour caractériser les structures internes. L'exploitation de photographies à des fins de quantification se limite dans de nombreuses études au suivi manuel de points épars à la surface des modèles (Donnadieu et al., 2003). Le développement de la modélisation analogique ces dernières années, le besoin toujours présent de comparer les mesures de laboratoire et de terrain, et enfin l'évolution des capteurs et des techniques de reconstruction ont amené les scientifiques à se tourner vers les possibilités offertes par la photogrammétrie numérique.

Un exemple récent d'utilisation de la photogrammétrie numérique en modélisation analogique est fourni par les travaux de Donnadieu et al. (Donnadieu et al., 2003). Une quantification de la déformation de différents modèles ayant trait à l'instabilité des volcans est réalisée dans cette étude. Trois techniques différentes sont exposées, dont une permettant la reconstruction 3D de la surface des modèles. Il s'agit d'une reconstruction selon une méthode de stéréophotogrammétrie classique, se basant une configuration stéréoscopique standard (couple de vues stéréoscopique à axe optique vertical). Une étape de calibrage à l'aide d'une grille de points connus, puis une mise en correspondance dense permet la génération d'un MNT avec une précision de 1 mm selon Z d'après Kelfoun (Kelfoun, 1999, Figure 2-1). Les couples d'images pris à des temps différents permettent l'étude de la déformation. En effet, une ortho-image, c'est-à-dire une photo corrigée de la parallaxe et de la distorsion optique (voir Kelfoun, 1999), peut être calculée pour chaque couple d'images. L'utilisation du corrélateur dense sur deux ortho-images successives et la comparaison des MNT successifs permettent alors de calculer la déformation selon les trois dimensions (Figure 2-1). Les champs de déformation peuvent être également calculés à partir de vues monoscopiques successives à axe vertical sur lesquelles est effectuée une corrélation dense. C'est l'une des deux autres techniques de photogrammétrie numérique employée dans l'article. Dans ce dernier cas, la parallaxe liée au relief de l'objet est corrigée avec une simple fonction d'élévation décrivant la géométrie du modèle (cône). La déformation détectée est inférieure au mm. Ces travaux montrent la puissance de l'outil qu'est la photogrammétrie numérique en laboratoire, à la fois par la simplicité relative de mise en oeuvre, par la précision de quantification atteinte, et enfin par le degré supplémentaire de

compréhension du phénomène étudié issu de la comparaison des mesures de laboratoire et de terrain. Les conclusions émises par Donnadiou et al. (Donnadiou et al., 2003) concernant les mesures effectuées durant la crise du Mont St-Helens (U.S.A) de 1980 et les données des expériences d'intrusion magmatique en sont un exemple probant.

Ces travaux ont encouragé le développement de l'approche de reconstruction proposée en laboratoire. Dans un premier temps, des modèles analogiques faisant appel à un dispositif expérimental simple ont servi de support pour le développement de la technique.

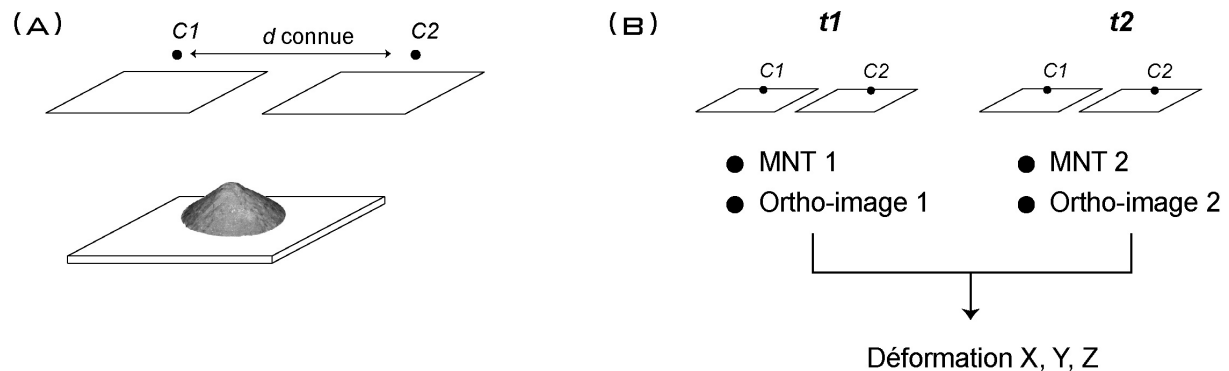


FIGURE 2-1 : STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTRIE EN LABORATOIRE SELON KELFOUN (KELFOUN, 1999).
 (A) DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL PERMETTANT LA GÉNÉRATION D'UN MNT À PARTIR D'UN COUPLE DE VUE STÉRÉOSCOPIQUE ET (B) LE CALCUL DES CHAMPS DE DÉFORMATION PAR CORRÉLATION DENSE D'IMAGES SUCCESSIVES.

2.1.2 CONDITIONS DE LABORATOIRE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le laboratoire offre des conditions idéales pour le développement d'une approche de reconstruction 3D. En effet, il permet :

- Le contrôle de l'éclairage et donc de l'illumination du modèle. Les expériences réalisées sont en effet éclairées de manière homogène afin de faciliter la mise en correspondance dans les images effectuée lors du processus de reconstruction. Ainsi une même zone photographiée sous plusieurs angles de vue devrait apparaître dans toutes les images avec une gamme d'intensité lumineuse relativement proche. Les zones d'ombre variant au cours du temps, pouvant poser des problèmes pour la mise en correspondance, sont en outre évitées de cette manière. L'éclairage peut également être ajusté en fonction des paramètres de prise de vue (ouverture du diaphragme, vitesse de prise de vue) et du mode d'acquisition des vues (sur un pied ou à main levée).
- Une acquisition simple, rapide et facilement renouvelable des images autour du modèle analogique étudié, ceci à moindre coût. L'échelle du laboratoire permet en effet de prendre les images à main levée ou à partir d'un pied d'appareil photo, ainsi que de renouveler aisément la prise de vues. Les essais de reconstruction peuvent donc être multipliés.

- Le contrôle de la qualité de l'image, en rapport avec l'éclairage, mais aussi avec le modèle étudié et la texture qui lui est associée et qu'il est alors possible de tester et de modifier.
- De tester facilement la technique sur des objets de géométrie connue.

Les modèles analogiques qui ont permis le développement de la technique correspondent à des cônes constitués d'un mélange de sable et de plâtre, et représentant des volcans à petite échelle (Figure 2-2).

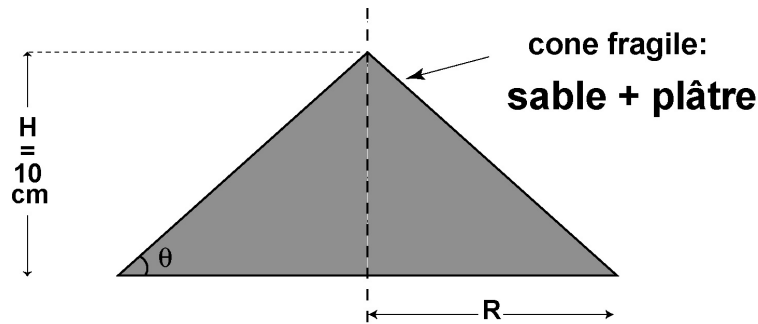


FIGURE 2-2 : SCHÉMA D'UNE EXPÉRIENCE ANALOGIQUE UTILISÉE POUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE DE RECONSTRUCTION 3D.

Initialement, ces expériences, faisant référence aux travaux de van Wyk de Vries et al. (van Wyk de Vries et al., 2000) et de Cecchi et al. ⁽¹⁾, contiennent une inclusion de silicone, analogue de roches altérées de plus faible résistance, et visent à étudier la déformation gravitaire des volcans au cœur altéré. Le paragraphe 3.2 du chapitre 3 est consacré à cette étude spécifique. Dans un premier temps, les modèles utilisés pour le développement de la méthode sont ces mêmes cônes auxquels on a retiré l'inclusion de silicone afin d'obtenir des modèles statiques. Seule la reconstruction 3D est en effet visée et l'acquisition des vues est également dans ce cas plus aisée et plus facile à tester.

Le mélange cohésif de plâtre et de sable, outre son importance dans le dimensionnement de modèles (paragraphe 3.2 du chapitre 3), permet d'obtenir une texture intéressante pour l'étude photogrammétrique. Cette texture est cependant renforcée par un saupoudrage de plâtre et de particules sombres (carbure de silicium, bois peint) afin de garantir une texture suffisamment riche dans les images, permettant et facilitant le processus de mise en correspondance (Figure 2-3).

1 Cecchi E, van Wyk de Vries B and Lavest JM (2003). Flank spreading and collapse of weak-cored volcanoes. Soumis à Bulletin of Volcanology.

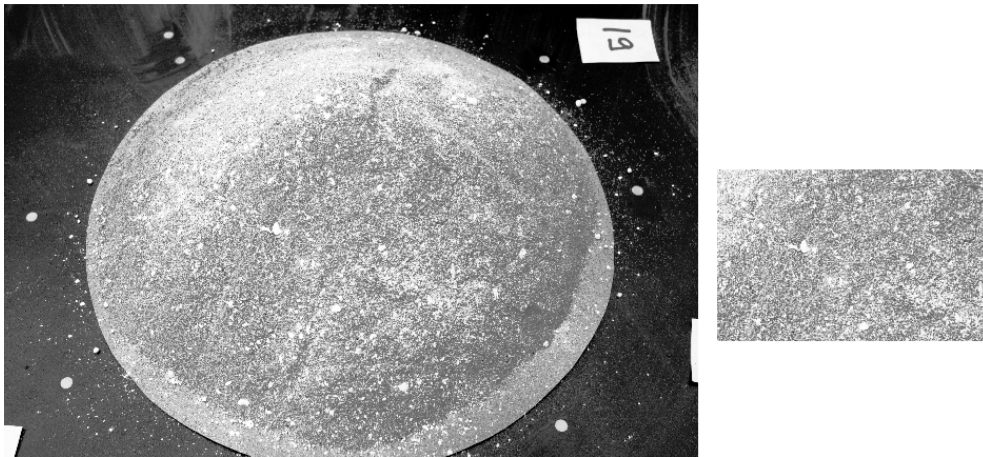


FIGURE 2-3 : UNE PHOTO D'UN MODÈLE ANALOGIQUE STATIQUE ET UN DÉTAIL DE SA TEXTURE (À DROITE).

2.1.3 PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE

La méthode de reconstruction repose sur trois étapes principales : (1) l'acquisition des données, (2) le calibrage du capteur et (3) la reconstruction 3D de l'objet étudié (Figure 2-4).

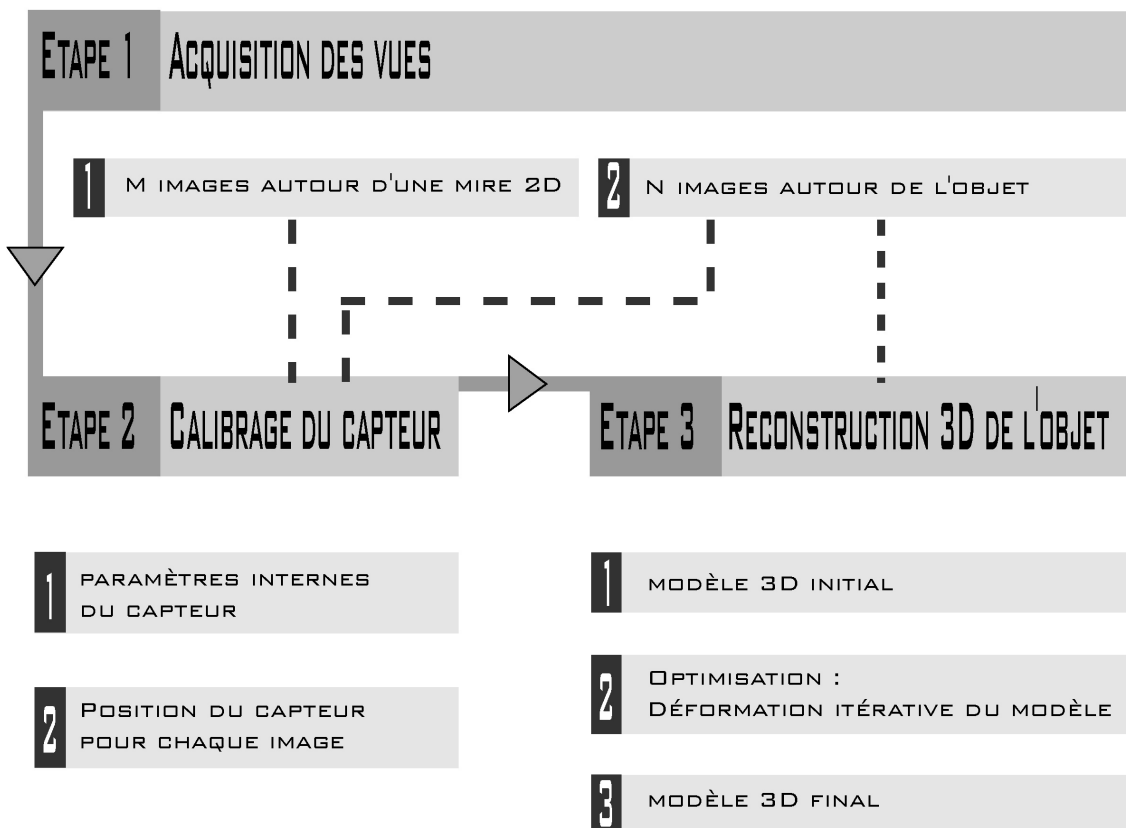
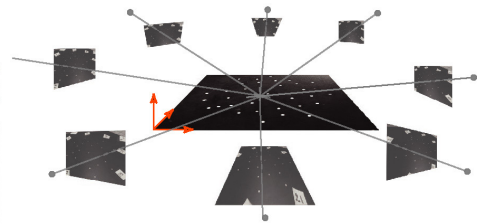
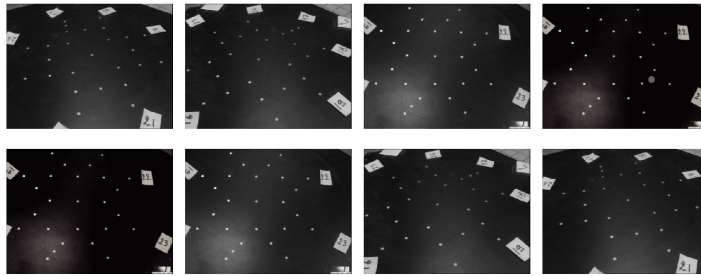


FIGURE 2-4 : PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE DE RECONSTRUCTION.

1. La première étape consiste à acquérir les vues qui vont servir à la fois au calibrage du capteur et à la reconstruction 3D de l'objet. En pratique, deux séries de vues sont acquises (Figure 2-5) : une première est capturée autour d'une mire 2D (Figure 2-6), une deuxième autour de l'objet à reconstruire.

1 M IMAGES AUTOUR D'UNE MIRE 2D



2 N IMAGES AUTOUR DE L'OBJET

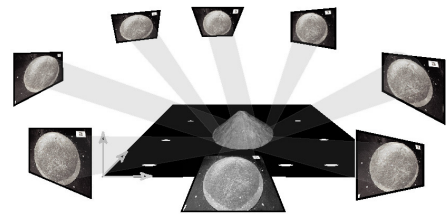
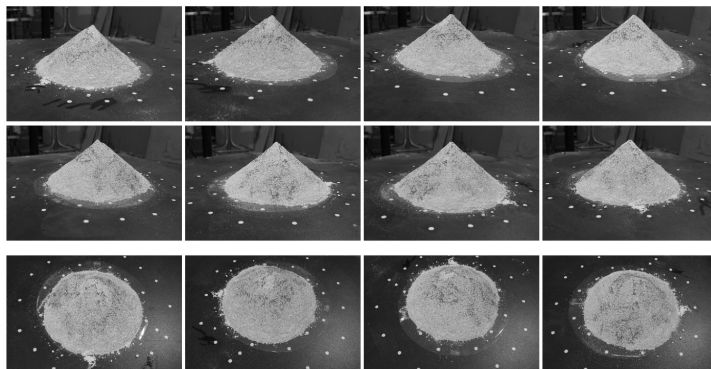


FIGURE 2-5 : ETAPE 1. LES DEUX SÉRIES DE VUES UTILISÉES DANS LA MÉTHODE DE RECONSTRUCTION ET LE MODE D'ACQUISITION DES VUES

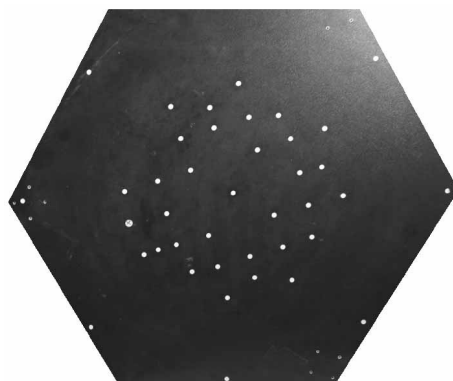


FIGURE 2-6 : LA MIRE D'ÉTALONNAGE. ELLE CORRESPOND À UN SUPPORT HORIZONTAL MUNI DE PASTILLES PHOTO-RÉFLÉCHISSANTES DONT LA POSITION APPROXIMATIVE EST CONNUE. 25 PASTILLES SONT VISIBLES SUR CET EXEMPLE DE MIRE 2D.

L'acquisition des vues se fait de manière à créer un faisceau de vues convergentes autour de la cible (mire 2D ou scène 3D à reconstruire). Six à dix vues sont en général acquises autour de la mire d'étalonnage composée de pastilles photo-réfléchissantes (Figure 2-6). Il est essentiel que les pastilles couvrent tout le champ du capteur afin de déterminer correctement les paramètres internes, notamment les paramètres de distorsion optique (voir paragraphe suivant sur le calibrage du capteur). En ce qui concerne la série autour de l'objet, le nombre de vues est variable et dépend de la scène à reconstruire. Dans le cadre du laboratoire, dix à quinze vues sont prises, en général douze, dont huit à intervalles à peu près réguliers selon une couronne à mi-hauteur autour du modèle, et quatre de manière plus plongeante. La couronne à mi-hauteur correspond à une configuration idéale pour obtenir des informations selon Z, c'est-à-dire qu'elle fournit une bonne vision du relief de l'objet. Elle permet également d'apprécier visuellement la qualité de reconstruction du modèle par projection de celui-ci dans les images : il est en effet possible de vérifier le degré de correspondance entre le profil du modèle reconstruit et celui de l'objet réel. La deuxième couronne, plus haute, garantit une couverture complète de la surface à reconstruire.

2. La deuxième étape correspond à l'étalonnage du capteur et à l'estimation précise de l'attitude spatiale (position et orientation) du capteur autour de l'objet à reconstruire (Figure 2-7). Cette étape est détaillée dans le paragraphe suivant (paragraphe 2.2). Elle utilise les deux séries de vues acquises lors de la première étape. Une méthode de calibrage multi-images basée sur une approche photogrammétrique et prenant en compte la distorsion optique du système est utilisée.

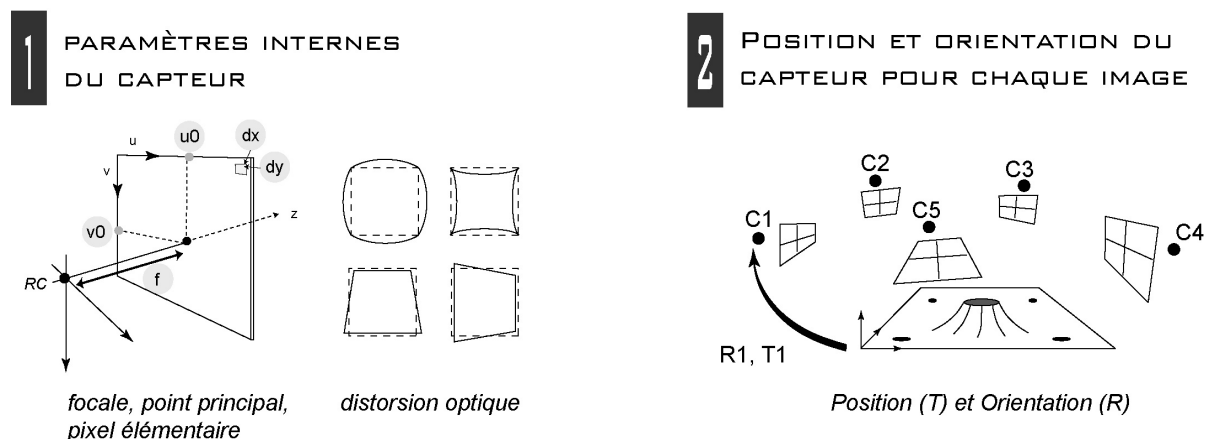


FIGURE 2-7 : DEUXIÈME ÉTAPE : LE CALIBRAGE DU CAPTEUR. LES PARAMÈTRES INTERNES DU CAPTEUR ET SON ATTITUDE SPATIALE POUR CHAQUE IMAGE SONT DÉTERMINÉS.

3. Une troisième et dernière étape concerne le processus de reconstruction 3D de l'objet (Figure 2-8). On dispose à ce stade d'une série de N vues réparties autour de l'objet et toutes référencées par rapport à un repère lié à l'objet. L'étape de reconstruction consiste à initialiser un modèle 3D générique maillé, et à effectuer une déformation itérative de celui-ci, avec un raffinement du maillage à chaque itération, de manière à satisfaire un critère basé sur une cohérence de texture multi-images.

La déformation consiste à calculer, pour une résolution du modèle donnée, les coordonnées en Z de tous les points 3D de manière à avoir un modèle 3D cohérent avec toutes les vues.

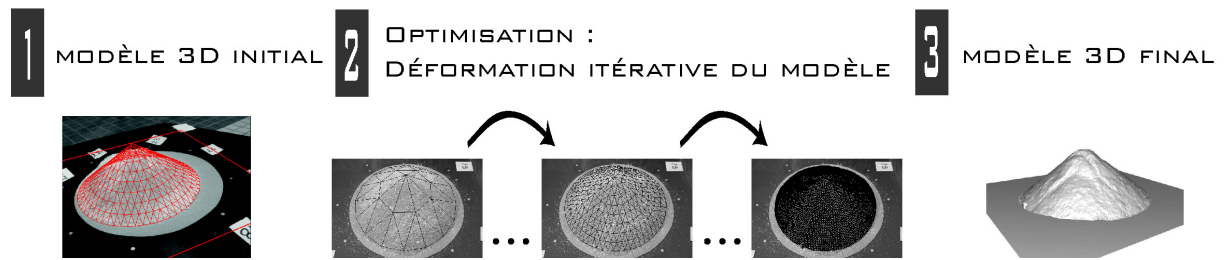


FIGURE 2-8 : TROISIÈME ÉTAPE : LA RECONSTRUCTION 3D DE L'OBJET.

2.2 ÉTALONNAGE DU CAPTEUR ET GÉOMÉTRIE EXTRINSÈQUE

2.2.1 CALIBRAGE D'UN CAPTEUR

La méthode de reconstruction proposée repose sur une première étape de calibrage du capteur. Voyons tout d'abord en quoi consiste le calibrage d'un capteur et quelles sont les différentes approches possibles. Nous présentons ici le calibrage selon le formalisme employé en géométrie projective.

2.2.1.1 Formulation du problème de calibrage

Le calibrage géométrique d'un capteur d'images est un processus généralement nécessaire pour son utilisation à des fins métrologiques. C'est une étape souvent indispensable pour la reconstruction tridimensionnelle d'une scène. Il consiste à déterminer une relation mathématique entre les coordonnées 3D des points d'une scène et les coordonnées 2D de ces points projetés dans l'image. Cette relation fait intervenir à la fois les paramètres internes du capteur, mais également la géométrie de celui-ci dans l'espace.

La terminologie que l'on emploiera dans ce mémoire est la suivante : sous le terme de calibrage géométrique, on regroupe la modélisation du capteur ou encore étalonnage du capteur, faisant référence aux paramètres physiques décrivant le capteur (paramètres intrinsèques), et la détermination de la géométrie extrinsèque du capteur, correspondant à la position et à l'orientation du capteur dans l'espace (paramètres extrinsèques).

Nous faisons référence dans notre étude aux capteurs CCD et donc à une représentation discrète de l'image. Notons qu'il existe également un calibrage radiométrique, mais celui-ci ne sera pas abordé dans notre étude car on estime qu'il est secondaire par rapport au calibrage géométrique.

Un système de calibrage standard comporte en général :

- Un système d'acquisition et de mémorisation d'images.
- Une mire de calibrage (grille ou objet étalon) composée d'éléments de référence de géométrie connue.
- Un algorithme de détection des éléments de référence de la mire dans les images.
- Un algorithme de mise en correspondance des éléments 3D de la mire et de leur projection dans les images. La transformation 3D / 2D se produisant lors de la formation de l'image et liant le repère de la mire à celui de l'image est calculée, le processus étant généralement réalisé de manière semi-automatique.

2.2.1.1.1 Modèle de caméra et type de projection

Différents modèles de caméra peuvent être adoptés pour décrire la formation d'une image, en fonction de la géométrie descriptive (par exemple projective ou affine) choisie, de la distorsion optique pouvant être prise en compte etc.

Le modèle de caméra utilisé est le **modèle Sténopé** (Pinhole model en anglais), qui est le modèle de projection le plus simple de formation d'une image (Figure 2-9). Selon ce modèle, tous les rayons optiques passent par un seul et même point, i.e. le centre optique. L'image ainsi obtenue est inversée par rapport à la scène réelle observée (Figure 2-9). Par simplification, on considère que le plan image est virtuellement placé entre le centre optique et la scène 3D de manière à obtenir une image non inversée.

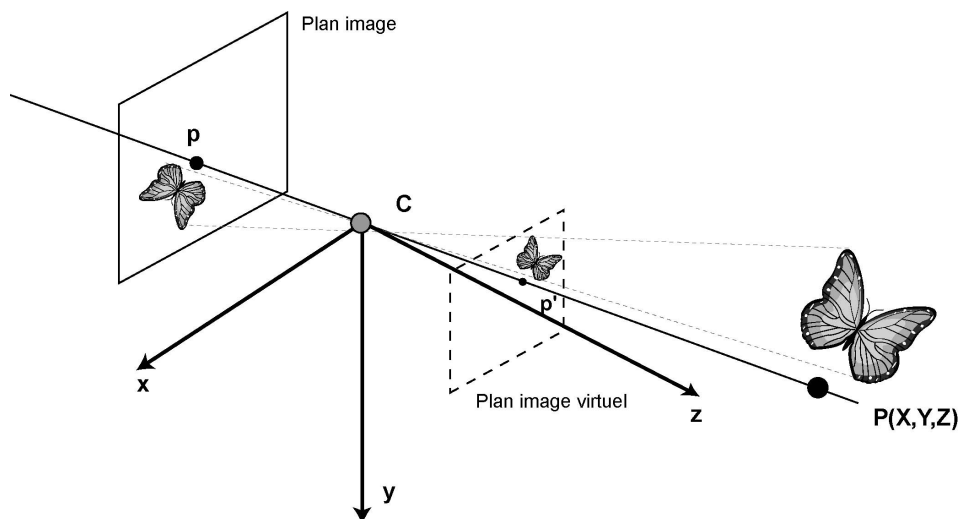


FIGURE 2-9 : MODÈLE STÉNOPÉ. C EST LE CENTRE OPTIQUE, P UN POINT 3D ET P ET P' LES PROJECTIONS DE P DANS LE PLAN IMAGE ET LE PLAN IMAGE VIRTUEL, AVEC $P = P'$.

Parmi les différentes projections possibles (orthographique, orthographique à l'échelle, perspective), nous faisons référence à la projection perspective modélisant le mieux la formation d'une image.

Dans un premier temps, voyons quelle est la formulation générale du problème de calibrage sans prise en compte de la distorsion.

2.2.1.1.2 Les changements de repères : du repère Objet au repère Image

La relation mathématique entre les coordonnées 3D des points d'une scène et les coordonnées 2D de ces points projetés dans l'image est établie par le passage du repère Objet (R_w) au repère Caméra (R_c), puis au repère Image (u, v) prenant en compte la digitalisation (Figure 2-10). Elle est donc conditionnée par deux changements de repères successifs et un changement de coordonnées dans le plan image lié à la digitalisation de l'image :

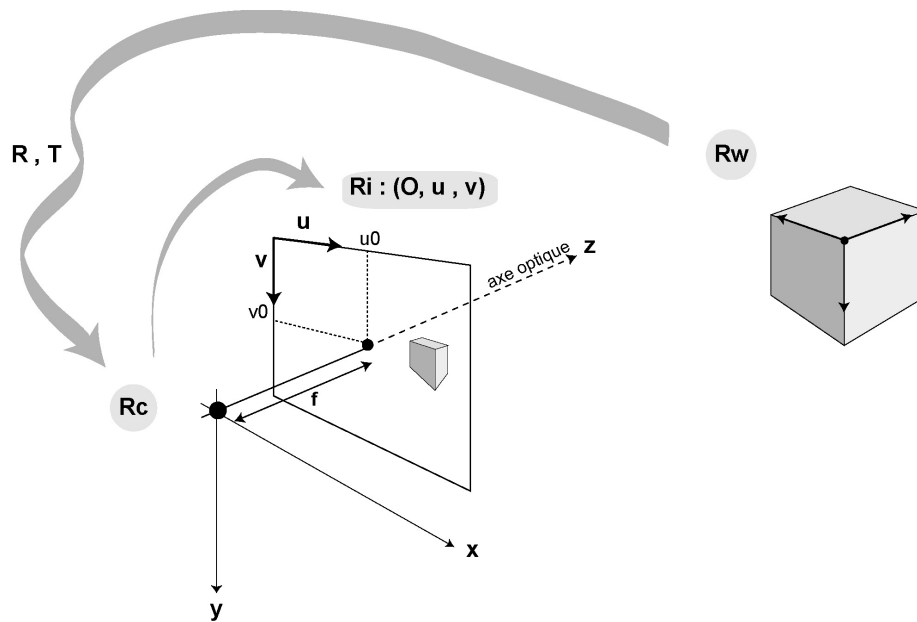


FIGURE 2-10 : CHANGEMENTS DE REPÈRES LORS DE LA FORMATION DE L'IMAGE ET SYSTÈME DE COORDONNÉES SUR LA MATRICE CCD. R_w , R_c ET $R_i (0, u, v)$ SONT RESPECTIVEMENT LES REPÈRES MONDE, CAMÉRA ET IMAGE. LE PASSAGE DE R_w À R_c SE FAIT PAR LE BIAIS D'UNE ROTATION (R) ET D'UNE TRANSLATION (T). f EST LA FOCALE, (u_0, v_0) LES COORDONNÉES DU POINT PRINCIPAL DANS L'IMAGE (VOIR LA DÉFINITION DANS LE TEXTE).

a. Changement de repère Objet / caméra

Ce changement permet d'exprimer les coordonnées d'un point du repère monde R_w dans le référentiel du capteur R_c . Ce passage s'exprime par le biais d'une rotation R et d'une translation T .

Soient $P_w = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ un point 3D exprimé dans le repère monde R_w et $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ le même point exprimé dans le repère du capteur.

Sous forme matricielle, le changement de repère s'écrit comme suit :

$$P_c = M_1 \cdot P_w \tag{Eq. 2.1}$$

Avec M_1 le couplage de la rotation R (3×3) (matrice orthonormée) et la translation T (3×1).

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.2}$$

b. Changement de repère Caméra / Image

Ce changement de repère correspond à l'équation de projection perspective (Figure 2-11).

FIGURE 2-11 : REPRÉSENTATION BIDIMENSIONNELLE D'UNE PROJECTION PERSPECTIVE. C EST LE CENTRE DU CAPTEUR, F EST LA FOCALE, P ET P' SONT LES PROJECTIONS DU POINT 3D P DANS LES PLANS IMAGES RÉEL ET VIRTUEL (P = P').

Soit $p = (x, y, z)^T$ la projection dans l'image de $P_c = (X_c, Y_c, Z_c)^T$ exprimée dans le repère du capteur. p s'exprime alors ainsi :

$$\begin{aligned} x &= \frac{f \cdot X}{Z} \\ y &= \frac{f \cdot Y}{Z} \\ z &= f \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Sous forme matricielle (notation en coordonnées homogènes), les équations de projections s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} \lambda \cdot x \\ \lambda \cdot y \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Avec λ le facteur multiplicatif introduit lors du passage de l'espace projectif R^3 à R^2 . En effet :

$$\begin{aligned} \lambda \cdot x &= f \cdot X_c \\ \lambda \cdot y &= f \cdot Y_c \\ \lambda &= Z_c \end{aligned}$$

Soit en divisant par λ :

$$\begin{aligned} x &= \frac{f \cdot X_c}{Z_c} \\ y &= \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} \end{aligned}$$

c. Changement de coordonnées dans le plan Image

Il est nécessaire d'exprimer le point projeté p dans le référentiel de l'image (u,v) tenant compte de la différence de pas selon x et y , due à la forme du pixel élémentaire et/ou à la cadence d'échantillonnage du signal s'il s'agit d'un système vidéo analogique.

Ainsi, dans le nouveau système de coordonnées, le point $p = (u,v)^T$ s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned} u &= \frac{x}{dx} + u_0 \\ v &= \frac{y}{dy} + v_0 \end{aligned} \tag{Eq. 2.5}$$

Avec :

- (dx, dy) les dimensions du pixel élémentaire de la matrice CCD selon x et y .
- (u_0, v_0) les coordonnées en pixels du point principal dans l'image, ce dernier correspondant à l'intersection de l'axe optique et du plan image (Figure 2-10).

Sous forme matricielle, la relation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \lambda \cdot u \\ \lambda \cdot v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \cdot x \\ \lambda \cdot y \\ \lambda \end{bmatrix} \tag{Eq. 2.6}$$

d. Expression générale

L'expression générale de la transformation liée à la formation de l'image est alors la suivante :

$$\begin{bmatrix} \lambda \cdot u \\ \lambda \cdot v \\ \lambda \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{int}} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{ext}} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{Eq. 2.7}$$

De manière plus condensée :

$$\begin{bmatrix} \lambda \cdot u \\ \lambda \cdot v \\ \lambda \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{int}} \cdot \mathbf{M}_{\text{ext}} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Avec $\mathbf{M}_{(3 \times 4)}$ la **matrice de calibrage** se décomposant en :

- une matrice \mathbf{M}_{int} regroupant **les paramètres intrinsèques** du capteur au nombre de 5 : f, u_0, v_0, dx, dy . On la retrouve fréquemment sous la forme suivante :

$$\mathbf{M}_{\text{int}} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec $f_x = \frac{f}{dx}$ et $f_y = \frac{f}{dy}$ donnant $\frac{f_x}{f_y} = \frac{dy}{dx}$, étant le rapport pixel, en général fourni par le constructeur (taille du pixel élémentaire), ce qui ramène à 4 le nombre de paramètres intrinsèques inconnus.

- Une matrice de **paramètres extrinsèques** \mathbf{M}_{ext} composée de 12 éléments indépendants du capteur exprimant sa position et son orientation dans l'espace : 9 paramètres pour la rotation (R_{11}, \dots, R_{33}) , et 3 paramètres pour la translation (T_x, T_y, T_z)

2.2.1.2 Les différentes approches possibles

Différentes approches de résolution du problème de calibrage existent. Globalement, ces diverses approches diffèrent selon la méthode de résolution des équations (linéaire ou non linéaire), la mire d'étalonnage et son degré de connaissance, le type de primitives détectées dans les images et la méthode de détection employée. Sans rentrer dans les détails, on peut classer ainsi les méthodes couramment rencontrées dans la littérature :

2.2.1.2.1 Les méthodes linéaires

Ces méthodes sont basées sur la résolution d'un système linéaire. Chaque appariement N , c'est-à-dire chaque mise en correspondance d'un élément 3D et de sa projection dans l'image, fournit deux équations linéaires en fonction des paramètres de calibrage. La matrice de calibrage $\mathbf{M}_{(3 \times 4)}$ à résoudre comporte 12 éléments inconnus. Ainsi il est possible de calibrer le système de vision grâce à 6 appariements non coplanaires (mires volumiques).

Le système linéaire surdéterminé est de type $\mathbf{AX} = \mathbf{0}$, avec \mathbf{A} une matrice de taille $2N \times 12$ ne dépendant que des éléments 3D et de leur projection 2D dans l'image, et \mathbf{X} la matrice composée des paramètres internes et externes de calibrage. Un tel système est typiquement résolu en employant

une décomposition en valeurs singulières (SVD, Singular Value Decomposition, Press et al., 1992) lors de laquelle le vecteur propre associé à la plus petite valeur propre de A est recherché.

On peut citer en exemple de ces méthodes linéaires les approches de Tsai ou Faugeras et al. (Faugeras and Toscani, 1987, Tsai, 1989).

Les avantages majeurs de ce type d'approche sont un temps de calcul relativement faible et une implémentation simple.

2.2.1.2.2 Les méthodes non linéaires

Un autre type d'approche consiste à minimiser les erreurs de mesure dans l'image, c'est-à-dire les différences entre des éléments 3D détectés dans l'image et leur projection. Ces erreurs de mesure sont exprimées sous forme d'un critère optimisé de manière non linéaire.

La non linéarité du problème de calibrage peut également être liée à la représentation de la matrice de rotation. L'utilisation par exemple des angles d'Euler (α, β, γ) , qui correspond à une représentation minimale à trois paramètres, implique un système non linéaire. Enfin, la prise en compte de la distorsion du système optique dans le problème de calibrage implique également une non linéarité du système.

Une seule ou plusieurs images sont utilisées selon les méthodes de résolution non linéaires. On peut distinguer parmi les approches non linéaires celles utilisant une mire 3D parfaitement connue de celles utilisant un modèle 3D approximatif :

a. Avec modèle 3D connu précisément

Dans ce cas, une mire volumique est en général employée (Robert, 1995). La géométrie de la mire est connue de manière très précise et permet le recouvrement des paramètres de calibrage. Ce type de méthodes garantit une meilleure stabilité des résultats comparativement aux méthodes linéaires, mais nécessite en contrepartie des valeurs initiales pour les paramètres de calibrage. De plus, certains auteurs (Lavest et al., 1998) ont montré que dans ce type d'approches, les erreurs introduites par la métrologie de la mire étaient non négligeables sur le résultat final de calibrage. En outre, selon l'application envisagée, l'utilisation d'une seule mire s'avère difficile, ce qui, de manière pratique, complexifie le processus de calibrage (coûts de construction et de mesure pouvant être importants). La mire peut également se déformer dans le cas d'une utilisation fréquente.

b. Sans modèle 3D précis

Il s'agit des méthodes photogrammétriques (Beyer, 1992, Lavest et al., 1998) dans lesquelles un ajustement de faisceaux permet l'estimation à la fois des paramètres de calibrage et de la position des éléments 3D de la mire, par minimisation d'un critère décrivant les erreurs de mesure dans les images. Ce type d'approche se distingue par une modélisation fine des phénomènes de distorsion du système optique introduisant des déformations dans l'image. La prise en compte de la distorsion permet de décrire de manière plus complète le capteur et donc de se rapprocher de la réalité physique du phénomène de formation de l'image. L'utilisation d'une mire plane connue approximativement permet de se détacher des erreurs de mesure 3D des mires conventionnelles et d'élargir le champ d'application de la métrologie en Vision par une simplification de mise en œuvre du calibrage. Ce type

d'approche nécessite une détection des primitives dans les images extrêmement précise pour garantir une stabilité des résultats.

2.2.1.2.3 Les méthodes d'autocalibrage

Enfin, on peut distinguer les méthodes d'autocalibrage, dans lesquelles les paramètres du capteur et la géométrie des vues sont estimées à partir des seules relations images 2D/2D, et non plus des relations 3D/2D sur lesquelles sont basées les méthodes citées précédemment. Ce type d'approche vise à s'affranchir de la connaissance à priori de la scène 3D, et donc ne repose pas sur l'utilisation d'une mire d'étalonnage. Ces méthodes reposent sur l'estimation de la matrice fondamentale (voir chapitre 1, paragraphe 1.2.3), qui permet de remonter aux paramètres de calibrage. Le problème de l'auto-calibrage se retrouve dans certaines méthodes de reconstruction 3D, où l'objectif est de recouvrir le modèle 3D d'une scène sans informations initiales sur le capteur, telles que certaines approches de type « structure à partir du mouvement » (Pollefeys, 2000) ou de type interactives (Becker et al., 1995, Faugeras et al., 1995). Les perspectives de ce type d'approche sont très attrayantes car elle permet une grande liberté quand à la mise en œuvre et au domaine d'application. Cependant ces méthodes ont une forte tendance à être instables car elles reposent uniquement sur une mise en correspondance dans les images qui est un problème délicat à traiter. De plus, ces méthodes ne prennent en général pas en considération la modélisation de la distorsion.

Le Tableau 2-1 résume les divers avantages et inconvénients liés à chaque type de méthode.

Type de méthode	Avantages (+)	Inconvénients (-)
Méthodes linéaires	Temps de calcul Implémentation	<ul style="list-style-type: none"> • Mire 3D • Instable • Pas de modélisation de la distorsion
Méthodes non linéaires avec modèle 3D précis	Modélisation de la distorsion	<ul style="list-style-type: none"> • Mire 3D • Conditions initiales • Influence importante des erreurs de mesure 3D de la mire (erreurs non gaussiennes) • Nécessité de plusieurs mires étalons pour différentes focales
Méthodes non linéaires sans modèle 3D précis	Modélisation de la distorsion Mire plane approximative	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions initiales • Sensibilité au processus de détection des primitives dans les images
Auto-calibrage	Aucune information 3D nécessaire Mise en correspondance 2D/2D automatisable	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de modélisation de la distorsion • Instable

TABLEAU 2-1 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES APPROCHES DE CALIBRAGE

2.2.2 MÉTHODE DE CALIBRAGE CHOISIE

Rappelons tout d'abord que les applications envisagées dans cette étude ont orienté notre choix vers un calibrage fort. En effet, parce qu'une des exigences établies initialement est la précision de reconstruction, et que le développement en laboratoire de la méthode le permet, on considère que les paramètres internes et externes du capteur sont connus avant d'entamer le processus de reconstruction 3D de la scène. Pour cela, une méthode de calibrage multi-images d'approche photogrammétrique a été retenue (Lavest et al., 1998). Cette méthode s'inscrit dans les méthodes non linéaires sans modèle 3D précis (voir paragraphe précédent).

Les avantages qu'elle présente sont les suivants :

- Une connaissance très précise de la mire d'étalonnage n'est pas nécessaire car une estimation de sa géométrie est effectuée lors du processus de calibrage.
- L'utilisation de plusieurs vues permet une meilleure estimation des paramètres de distorsion que dans le cas d'un calibrage classique.
- La redondance d'informations (plusieurs images) permet de mieux contraindre le système et de minimiser les erreurs de mesure effectuées dans les images, conduisant à une plus grande fiabilité des résultats de calibrage.
- La méthode est souple d'utilisation permettant si besoin de réaliser le calibrage sur le terrain aussi simplement qu'en laboratoire, au moins concernant les paramètres internes du capteur.

2.2.2.1 Modèle mathématique utilisé

La relation 2D / 3D selon le modèle optique sténopé peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \lambda_i \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \mathbf{T} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Avec :

- $P (X_i, Y_i, Z_i)$ est un point 3D de la mire défini dans le repère monde ($R_w - X Y Z$).
- $p (x_i, y_i, z_i)$ est un point image défini dans le repère caméra (R_c).
- λ_i est un facteur d'échelle introduit lors du passage de l'espace projectif R^3 à R^2 .
- $(T_x, T_y, T_z)^T$ est le vecteur de translation.
- \mathbf{R} est la matrice de rotation, composée de 9 éléments (r_{11}, \dots, r_{33}) et paramétrée par les trois angles d'Euler : α , rotation autour de l'axe X , β , rotation autour de l'axe Y , γ rotation autour de l'axe Z . La matrice de rotation s'écrit comme suit :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cdot \cos \beta & \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \alpha & \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha + \sin \gamma \cdot \sin \alpha \\ \sin \gamma \cdot \cos \beta & \cos \gamma \cdot \cos \alpha + \sin \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha & \sin \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha - \cos \gamma \cdot \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \cdot \sin \alpha & \cos \beta \cdot \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Les expressions suivantes, extraites de l'équation Eq. 2.9 sont appelées **équations de colinéarité** et expriment le point image p dans le repère du capteur :

$$x = f \cdot \frac{r_{11} \cdot X + r_{12} \cdot Y + r_{13} \cdot Z + T_x}{r_{31} \cdot X + r_{32} \cdot Y + r_{33} \cdot Z + T_z}$$

Eq. 2.11

$$y = f \cdot \frac{r_{21} \cdot X + r_{22} \cdot Y + r_{23} \cdot Z + T_y}{r_{31} \cdot X + r_{32} \cdot Y + r_{33} \cdot Z + T_z}$$

Avec :

- f est la distance focale du capteur.
- Les r_{ij} sont extraits de la matrice de rotation \mathbf{R} .

Si on veut exprimer le point p dans le référentiel image, il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes d'échantillonnage et de distorsion optique apparaissant à la surface des lentilles et conduisant à des déformations dans l'image :

$$\begin{aligned} x &= (u + e_x - u_0) \cdot dx - do_x \\ y &= (v + e_y - v_0) \cdot dy - do_y \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.12}$$

Où :

- (u, v) sont les coordonnées image d'un point p dans le référentiel pixel.
- (u_0, v_0) sont les coordonnées du point principal dans le référentiel pixel.
- (dx, dy) sont les facteurs d'échelle du pixel élémentaire.
- e_x, e_y sont les erreurs de mesure selon x et y , c'est-à-dire les corrections à apporter afin d'obtenir une correspondance parfaite entre les points 3D projetés et les points 2D correspondants détectés dans les images.
- do_x et do_y sont les composantes de distorsion optique selon x et y .

On peut distinguer deux types de distorsion : la distorsion radiale do_r et la distorsion tangentielle do_t (Figure 2-12)

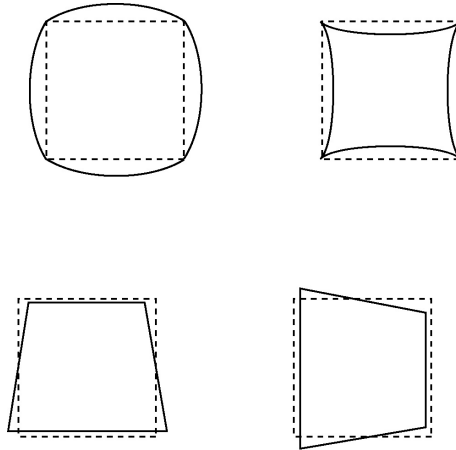


FIGURE 2-12 : EFFETS DE LA DISTORSION RADIALE (SCHÉMAS DU HAUT) ET TANGENTIELLE (SCHÉMAS DU BAS)

Ces distorsions se modélisent classiquement en photogrammétrie par des polynômes de la forme suivante (Photogrammetry, 1980) :

Pour la distorsion radiale :

$$\begin{aligned} do_{xr} &= (u - u_0) \cdot dx \cdot (a_1 \cdot r^2 + a_2 \cdot r^4 + a_3 \cdot r^6) \\ do_{yr} &= (v - v_0) \cdot dy \cdot (a_1 \cdot r^2 + a_2 \cdot r^4 + a_3 \cdot r^6) \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Pour la distorsion tangentielle :

$$\begin{aligned} do_{xt} &= p_1 \left[r^2 + 2(u - u_0)^2 \cdot dx^2 \right] + 2 \cdot p_2 (u - u_0) \cdot dx \cdot (v - v_0) \cdot dy \\ do_{yt} &= p_2 \left[r^2 + 2(v - v_0)^2 \cdot dy^2 \right] + 2 \cdot p_1 (u - u_0) \cdot dx \cdot (v - v_0) \cdot dy \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Avec :

- a_1, a_2, a_3 , les coefficients du polynôme modélisant la distorsion radiale
- p_1, p_2 , les coefficients du polynôme modélisant la distorsion tangentielle
- r , la distance radiale dans l'image depuis le point principal :

$$r = \sqrt{(u - u_0)^2 \cdot dx^2 + (v - v_0)^2 \cdot dy^2} . \text{ On suppose que la distorsion est nulle pour } r = 0 .$$

En couplant les équations Eq. 2.11 et Eq. 2.12, on obtient les équations de colinéarité sous la forme suivante :

$$u + e_x = u_0 + (do_{xr} + do_{xt}) + f_x \cdot \frac{r_{11} \cdot X + r_{12} \cdot Y + r_{13} \cdot Z + T_x}{r_{31} \cdot X + r_{32} \cdot Y + r_{33} \cdot Z + T_z} = P(\Phi)$$

Eq. 2.15

$$v + e_y = v_0 + (do_{yr} + do_{yt}) \cdot \frac{f_x}{f_y} + f_x \cdot \frac{r_{21} \cdot X + r_{22} \cdot Y + r_{23} \cdot Z + T_y}{r_{31} \cdot X + r_{32} \cdot Y + r_{33} \cdot Z + T_z} = Q(\Phi)$$

Avec f_x et f_y les rapports de la distance focale par dx et dy respectivement, et Φ le vecteur de paramètres inconnus à déterminer. On fixe en général $dx = 1$ car la projection perspective est définie à un facteur d'échelle près.

2.2.2.2 Résolution du problème

La méthode de calibrage repose sur l'utilisation de plusieurs vues convergentes d'une mire plane connue approximativement et composée de pastilles photo-réfléchissantes (Figure X et X). Calibrer le capteur revient à estimer le vecteur de paramètres suivant :

$$\Phi_{9+6m+3n} = [u_0, v_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y,$$

$$X^1, Y^1, Z^1, \dots, X^n, Y^n, Z^n,$$

Eq. 2.16

$$T_x^1, T_y^1, T_z^1, \alpha^1, \beta^1, \gamma^1, \dots, T_x^m, T_y^m, T_z^m, \alpha^m, \beta^m, \gamma^m]^T$$

Où :

- $u_0, v_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y$ sont les 9 paramètres intrinsèques,
- $T_x^1, T_y^1, T_z^1, \alpha^1, \beta^1, \gamma^1, \dots, T_x^n, T_y^n, T_z^n, \alpha^n, \beta^n, \gamma^n$ sont les $6 \times m$ paramètres extrinsèques, m étant le nombre d'images,
- $X^1, Y^1, Z^1, \dots, X^n, Y^n, Z^n$ sont les $3 \times n$ coordonnées des points de la mire, n étant le nombre de points sur la mire.

2.2.2.2.1 Généralités sur l'estimation paramétrique

Une première parenthèse théorique concernant l'estimation paramétrique peut être effectuée.

On se retrouve face au problème fréquent consistant à trouver un modèle dépendant de paramètres ajustables et décrivant un ensemble de mesures. Les paramètres ajustables sont dans notre cas le vecteur Φ et l'ensemble des mesures correspond à l'ensemble des équations de colinéarité données par chaque appariement 3D/2D. En général, une fonction de coût, aussi appelée critère, et mesurant la ressemblance entre le modèle et les mesures, est définie pour estimer les paramètres inconnus.

Quelques éléments théoriques s'imposent :

Soit un modèle composé de M paramètres représentés sous le vecteur Φ . Le modèle permet de décrire N mesures représentées par la fonction $y(a)$:

$$y(a) = y(a, \Phi)$$

Eq. 2.17

Une des méthodes les plus répandues pour estimer les paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). Elle repose sur la maximisation de la probabilité ou vraisemblance d'obtenir une mesure, les paramètres inconnus étant donnés. Supposons que le bruit est gaussien (distribution normale), et centré autour de $y(a)$ pour chaque mesure indépendante y_i , et que les écart-types σ_i de cette distribution soient les mêmes en chaque point (σ). La probabilité de cet ensemble de données est égale au produit de la probabilité en chaque point. La probabilité ou la vraisemblance vaut alors :

$$P \sim \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \Pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\left(\frac{y_i - y(a)}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right)^2} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Maximiser la vraisemblance revient à maximiser son logarithme, ou encore à minimiser l'inverse de son logarithme :

$$\text{Minlog}\left(\frac{1}{P}\right) = \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - y(a)]^2}{2 \cdot \sigma_i^2} + N \cdot \log \sigma \quad \text{Eq. 2.19}$$

Les approches au sens des moindres carrés sont donc équivalentes à une approche au sens du maximum de vraisemblance pour des données suivant une distribution normale. Notons que la contrainte de similitude des écarts-type de chaque mesure (σ) peut être relaxée : on parle alors d'approche au sens des moindres carrés pondérés, ou « weighted least squares fitting » en anglais.

Selon la méthode des moindres carrés, on cherche à minimiser une somme des différences au carré entre le modèle et la réalité, c'est-à-dire que l'on cherche les paramètres inconnus du vecteur Φ tel que le critère suivant soit minimum :

$$C(\Phi) = (y(a) - y(a, \Phi))^T \cdot W \cdot (y(a) - y(a, \Phi)) \quad \text{Eq. 2.20}$$

Où W est une matrice pondérale représentant la confiance σ_i que l'on a dans les points de mesure.

Il arrive fréquemment que le modèle ne soit pas linéaire pour ses paramètres et qu'une méthode itérative s'impose. C'est le cas rencontré dans la méthode de calibrage choisie, mais également dans le processus de reconstruction proposé.

2.2.2.2.2 Le critère choisi

Le problème, au sens des moindres carrés, est de trouver la valeur de ce vecteur qui minimise l'erreur suivante :

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (e_{xij}^2 + e_{yij}^2) \quad \text{Eq. 2.21}$$

Étant donnée que $P(\Phi)$ et $Q(\Phi)$ sont des fonctions non linéaires vis-à-vis des paramètres du vecteur Φ , la méthode d'optimisation non linéaire de **Levenberg-Marquardt** (Press et al., 1992) est utilisée pour l'optimisation du critère S . Un nombre minimum d'images est requis pour un nombre de points donnés sur la mire afin que le système soit surdéterminé. Le nombre de mesures doit en effet être supérieur ou égal au nombre d'inconnues : $2 \cdot m \cdot n \geq 9 + 6 \cdot m + 3 \cdot n$. Plus de détails concernant la résolution du problème, notamment l'écriture du problème sous forme matricielle, sont donnés dans Lavest et al. (Lavest et al., 1998).

Un aparté sommaire peut être cependant fait au sujet de la routine d'optimisation employée, car elle le sera à nouveau dans le processus de reconstruction 3D :

La méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt intègre deux autres méthodes d'optimisation qui sont la méthode de descente du gradient et la méthode de Newton. A l'itération $(r + 1)$, le vecteur de paramètres à trouver Φ sera :

$$\Phi_{r+1} = \Phi_r - \left(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + \mu \cdot \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot S(\Phi)_r \quad \text{Eq. 2.22}$$

Où \mathbf{A} est la matrice Jacobienne, \mathbf{A}^T sa matrice transposée et \mathbf{I} la matrice identité. Le facteur μ détermine la tendance qu'a l'algorithme à se rapprocher de la méthode de plus grande pente (μ grand) ou de Newton (μ petit). Si le critère $S(\Phi)_{r+1} > S(\Phi)_r$, le poids μ est multiplié par un facteur (en général 10) et la mise à jour de $S(\Phi)_{r+1}$ n'est pas prise en compte : $S(\Phi)_{r+1} = S(\Phi)_r$. Si la valeur du critère a diminué, le poids est divisé par le même facteur et on passe à l'itération suivante.

Le processus de calibrage fournit les paramètres du capteur avec une erreur résiduelle proche de 0.02 pixels (Lavest et al., 1998).

2.2.2.3 Mise en œuvre

L'étape de calibrage et celle de reconstruction sont intimement liées. Si d'un point de vue théorique ces deux tâches peuvent être considérées comme indépendantes, il peut être intéressant d'un point de vue métrologique de les lier pour augmenter la précision de la mesure.

En pratique, on dispose de deux séries de vues acquises autour de la mire et autour de l'objet. Ces deux séries interviennent dans le processus de calibrage. Sur chacune des images, un certain nombre de points 3D correspondants à des cercles photo-réfléchissants, est visible. Une détection subpixelaire des taches est alors effectuée pour chaque vue. Cette détection est basée sur une paramétrisation de la transition de luminance entre la pastille et son support, et prend en compte la transformation géométrique et radiométrique de la tache lors de sa projection dans l'image. Les résultats de cette détection et une initialisation du vecteur de calibrage (localisation des images selon

DeMenthon and Davis, 1995, et initialisation grossière des paramètres internes et des points de la mire par l'utilisateur) permettent de débiter le processus d'optimisation.

La connaissance des paramètres intrinsèques du capteur et de sa géométrie extrinsèque autour de l'objet est indispensable pour débiter le processus de reconstruction. Deux configurations sont possibles (Figure 2-13) :

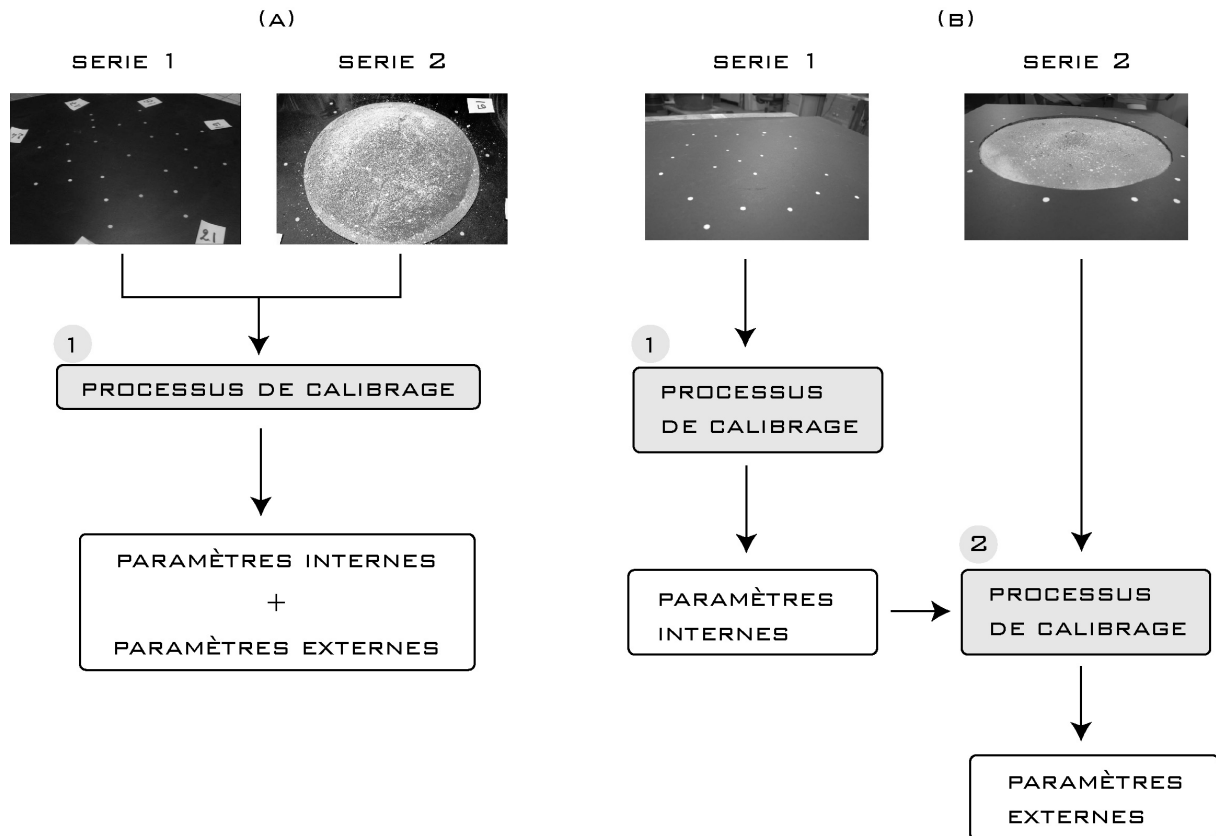


FIGURE 2-13 : LES DEUX CONFIGURATIONS POSSIBLES LORS DU CALIBRAGE : (A) L'OBJET À RECONSTRUIRE REPOSE SUR LA MIRE D'ÉTALONNAGE : LA SÉRIE DE VUES AUTOUR DE LA MIRE (SÉRIE1) ET LA SÉRIE AUTOUR DE L'OBJET (SÉRIE2) SONT TRAITÉES SIMULTANÉMENT. (B) L'OBJET À RECONSTRUIRE NE REPOSE PAS SUR LA MIRE. LES DEUX SÉRIES DE VUES SONT TRAITÉES SUCCESSIVEMENT.

(a) si le dispositif expérimental le permet, le modèle analogique est construit sur la mire de manière à laisser paraître quelques points 3D (pastilles photo-réfléchissantes circulaires) qui vont permettre de calculer la géométrie extrinsèque du dispositif (positions et orientations du capteur). En effet, si un premier calibrage utilisant les vues autour de la mire est effectué, alors on connaît la position exacte des points 3D et les paramètres internes du capteur. Le vecteur de paramètres inconnus est alors composé des seuls paramètres externes pour la deuxième série de vues. En réalité, les deux séries de vues sont combinées dans le processus de calibrage pour calculer simultanément tous les paramètres.

(b) Dans le cas où le modèle analogique ne repose pas sur la mire d'étalonnage, les deux séries de vues sont traitées séparément : seuls les paramètres internes sont intéressants à l'issue du calibrage

utilisant la série de vue autour de la mire, et sont utilisés lors d'un deuxième passage dans le logiciel de calibrage utilisant cette fois la série autour de l'objet. Des pastilles auront préalablement été disposées autour du modèle à reconstruire et permettront de calculer les paramètres externes (ainsi que la position exacte des pastilles). Le vecteur de paramètres inconnus dans la deuxième phase de calibrage utilisant les vues autour du modèle est alors composé des paramètres extrinsèques et des coordonnées des points 3D disposés autour du modèle.

2.2.3 TYPE DE CAPTEUR UTILISÉ

Le capteur utilisé est un est appareil photo numérique Nikon D1 de résolution 2000 x 1312 pixels à matrice couleur (Figure 2-14). Dans notre cadre d'application, cet appareil présente les avantages suivants :

- De type reflex, il permet l'utilisation d'objectifs fixes de diverses focales. Le calibrage d'objectifs fixes est plus simple que celui d'un zoom (Gaspard, 2001). Les objectifs d'ailleurs utilisés pour nos prises de vues (en laboratoire et sur le terrain) correspondent à un 28 mm et un 18 mm (focale à multiplier par 1.5 pour ramener à une taille de capteur standard).
- C'est un matériel proposé au grand public, bien qu'il reste, en raison de son prix, dans la catégorie matériel professionnel (environ 6000 euros pour le boîtier seul).
- C'est un appareil de grande qualité, en raison notamment de son optique et de sa matrice CCD. En effet, la taille importante de cette dernière (23.6 x 15.5 mm) permet d'obtenir une qualité de signal supérieure à beaucoup d'autres capteurs proposés sur le marché.



FIGURE 2-14 : APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE NUMÉRIQUE NIKON D1. EXTRAIT DE [HTTP://WWW.DPREVIEW.COM/REVIEWS/NIKOND1/](http://www.dpreview.com/reviews/NIKOND1/).

Notons que les algorithmes de calibrage et de reconstruction composant notre approche utilisent des images Noir et Blanc. Les images acquises au cours de nos expériences sont prises au format brut Tiff Noir et Blanc. Or l'appareil possède une matrice couleur, ce qui implique une conversion par l'appareil que nous ne contrôlons pas, et qui peut éventuellement affecter, dans une moindre mesure, les mesures effectuées dans l'image.

2.3 L'ÉTAPE DE RECONSTRUCTION 3D

Une fois le capteur calibré, le processus de reconstruction 3D multi-vues de la scène étudiée peut être engagé.

2.3.1 HYPOTHÈSES INITIALES

Un certain nombre d'hypothèses initiales sont émises.

- Tout d'abord, on suppose que le capteur est étalonné, et que sa position et son orientation dans l'espace sont précisément connus, comme cela vient d'être discuté dans le paragraphe précédent.

- Une deuxième hypothèse majeure dans notre approche de reconstruction est la connaissance a priori grossière de la scène à reconstruire. En effet, on émet l'hypothèse que l'on connaît approximativement la scène à reconstruire, ce qui constitue en volcanologie une hypothèse simple et réaliste. En laboratoire, le dispositif expérimental est connu et la construction des modèles analogiques est contrôlée par l'expérimentateur. Concernant une application de terrain, les missions sont en général initiées par des experts qui ont une connaissance de la zone d'étude, comme c'est typiquement le cas dans le cadre d'une surveillance volcanologique. Cette hypothèse forte permet l'initialisation d'un modèle 3D grossier en début de procédure.

- Une hypothèse est également faite en ce qui concerne les propriétés de réflectance des matériaux et d'illumination de la scène. Un type de matériau peut être représenté par sa fonction de réflectance. Rappelons que la réflectance est une mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente, et se traduit comme étant le rapport de la lumière incidente sur la lumière réfléchie (Girard and Girard, 1999).

Soit E l'énergie reçue par un objet :

$$E = a + t + r$$

Où a est l'énergie absorbée, t est l'énergie transmise et r est l'énergie réfléchie.

Alors la réflectance R peut s'exprimer comme suit :

$$R = \frac{r}{E}$$

La fonction de réflectance d'un matériau est en général complexe et exprime la relation entre la longueur d'onde du spectre heurtant le matériau, l'orientation de la surface du matériau, l'orientation de la source lumineuse et le point d'observation du matériau (cas simpliste d'une monosource et d'un seul type de réflexion). Certaines fonctions simples, dépendant d'un seul ou de quelques paramètres, sont cependant couramment employées. C'est le cas du modèle de **réflectance Lambertienne**, adopté dans l'approche de reconstruction développée. Ce modèle représente un cas idéal où la surface apparaît d'intensité lumineuse identique quelle que soit la direction d'illumination. La plupart

des méthodes de reconstruction adoptent cette hypothèse permettant d'exploiter simplement la notion d'auto ou de photo-consistance (voir la section 1.3.3.4 « approches volumiques » du chapitre 1). D'autres modèles sont cependant possibles (Samaras and Metaxas, 1998) mais restent rarement employés de part la complexité des phénomènes mis en jeu et de leur formulation, venant ajouter une difficulté majeure supplémentaire au problème de la reconstruction 3D. Cela représente d'ailleurs l'un des axes de recherche prometteur en Vision par Ordinateur, car la prise en considération de modèles de réflectance plus complexes modélisant de manière plus juste la réalité permettrait certainement une nette amélioration de la reconstruction 3D et de son rendu.

- Enfin, on fait l'hypothèse que les images sont suffisamment texturées pour effectuer des mesures de corrélation. La texture naturelle des modèles de laboratoire peut être contrôlée de manière à avoir des images présentant une texture riche, et les surfaces naturelles en domaine volcanique permettent en général l'obtention d'images texturées (voir chapitre 4).

2.3.2 MODÈLE 3D INITIAL

La connaissance grossière de l'objet d'étude permet la création d'un modèle 3D initial approximant la surface réelle. Ce modèle sera ensuite déformé lors de la phase suivante d'optimisation.

Mode de représentation de la surface

Tout d'abord se pose la question du mode de représentation de la surface à reconstruire (Cross et al., 2000, Fua et al., 1995). La topologie d'une surface peut être représentée de différentes manières : surfaces paramétrées, comme par exemple les surfaces maillées (Delingette, 1997, Fua and Sander, 1992, Naranayan et al., 1998), les produits de tenseurs description volumique par un ensemble de voxels, hypersurfaces (Sethian, 1998). Une représentation de l'objet d'étude par une surface paramétrée sous forme d'un maillage triangulaire constitue notre choix. Cette représentation possède en effet plusieurs avantages : (1) l'information de plusieurs images peut être prise en compte car à chaque facette du modèle virtuel peuvent être associées plusieurs informations 2D. (2) Elle est simple à implémenter dans notre cas (maillage régulier). (3) Elle permet la création aisée et rapide d'un rendu car l'élément élémentaire qu'est la facette triangulaire est largement utilisé en infographie. (4) Elle permet également de représenter des surfaces de topologie arbitraire. (5) Elle conduit enfin à la possibilité d'une approche multi-échelles de part le raffinement possible du maillage par subdivision des facettes triangulaires.

Ce choix implique une approximation locale planaire de la surface à reconstruire. Cette approximation tend à être vérifiée lorsque le maillage est fin et la reconstruction 3D proche de la surface réelle, c'est à dire en fin de processus de reconstruction.

Géométrie du modèle 3D

Étant donné que la méthode est développée à partir de modèles analogiques représentant des cônes de sable et de plâtre (Figure 2-2), le modèle initial est originellement un cône parfait composé de n facettes triangulaires de même taille et de P points 3D (Figure 2-15).

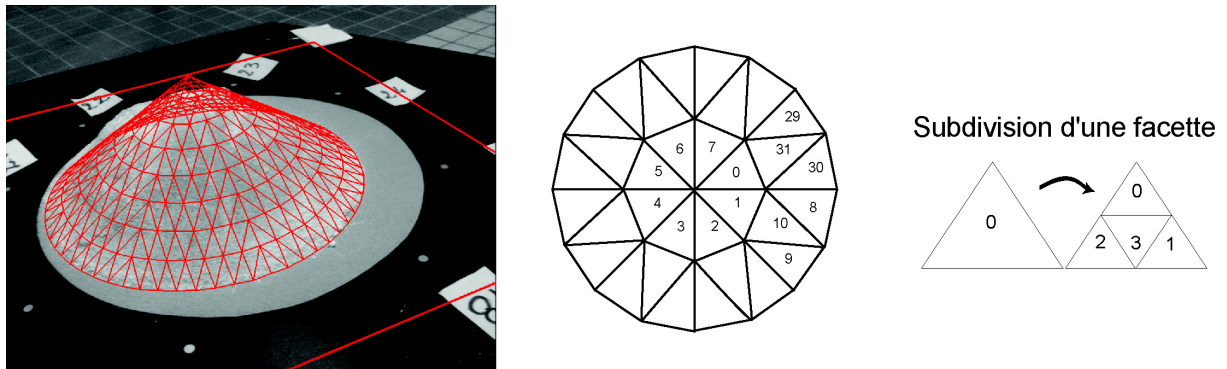


FIGURE 2-15 : MODÈLE INITIAL MAILLÉ, COMPOSÉ DE N FACETTES TRIANGULAIRES ET DE P POINTS 3D.

Le nombre de facettes et de points est facilement paramétrable, ce qui permet une approche multi échelles de la reconstruction de la surface. Soit R la résolution du modèle.

$$n = 2^{2R+3} \quad \text{Eq. 2.23}$$

Lors du raffinement du maillage, chaque facette est subdivisée en 4 facettes de taille identique (Figure 2-15). Le tableau X ci-après donne le nombre de points et de triangles d'un tel modèle 3D à différentes résolutions.

Résolution R	Nombre de points P	Nombre de triangles n
1	25	32
2	81	128
3	289	512
4	1089	2048
5	4225	8192
6	16641	32768

TABEAU 2-2 : NOMBRE DE POINTS ET DE FACETTES DU MODÈLE 3D JUSQU'À UNE RÉOLUTION $R=6$, RÉOLUTION MAXIMALE EN GÉNÉRALE ATTEINTE DANS LES RECONSTRUCTIONS RÉALISÉES.

Il est aisé de créer, avec une telle représentation, un modèle de géométrie différente et s'adaptant à d'autres types d'expériences. Un plan est par exemple tout à fait envisageable en tant que surface initiale. Seule l'initialisation du modèle changera. Un outil de déformation manuelle des points 3D du modèle a été créé à cette fin. Celui-ci permet une interactivité avec l'utilisateur qui peut modifier simplement si nécessaire la géométrie du modèle 3D initial en début de procédure. L'utilisation de cet

outil peut cependant entraîner la perte de régularité du maillage, ce qui peut avoir des répercussions sur la reconstruction 3D finale en terme d'homogénéité de résolution et donc de précision.

Initialisation du modèle

Le modèle 3D est initialisé à partir des informations contenues dans les images. En effet, les relations 2D/3D sont connues pour chaque image à l'issue du calibrage. Le diamètre, la hauteur et l'emplacement du cône dans le référentiel lié à l'objet sont estimés au cours de l'initialisation.

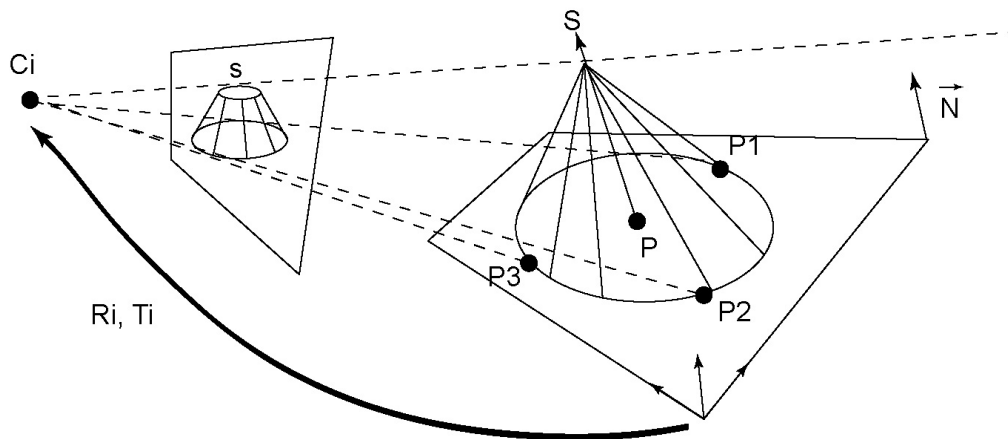


FIGURE 2-16 : INITIALISATION DU MODÈLE PAR UNE SURFACE CONIQUE.

Comme le montre la figure X trois points déterminés dans l'image à la base du modèle permettent de calculer, par un lancer de rayons, leur intersection sur le plan support du modèle (i.e. les points P_1, P_2, P_3). Le cercle passant au mieux par ces trois points est alors estimé. On peut ensuite définir le vecteur normal au cercle passant en son centre (\vec{PS}). Le sommet du cône est initialisé à partir d'un dernier point choisi dans l'image, en estimant le point sur la droite support de la normale au cône le plus proche du vecteur issu du centre optique de la caméra ($\vec{C_iS}$). La figure X illustre l'interface graphique développée et le modèle initial projeté dans une des images.

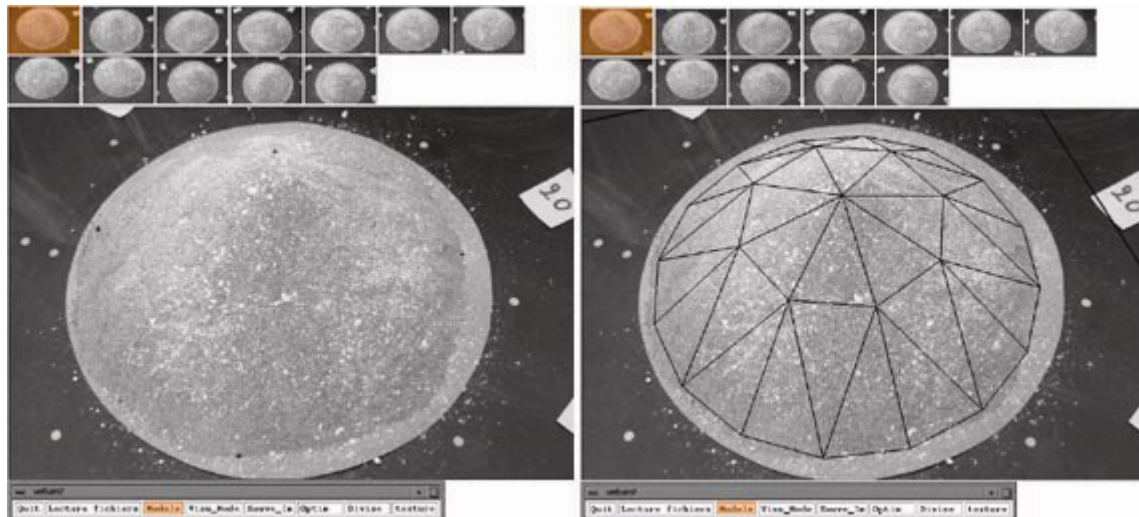


FIGURE 2-17 : INTERFACE GRAPHIQUE DÉVELOPPÉE ET INITIALISATION DU MODÈLE. LA COLLECTION DE VUES AUTOUR DE L'OBJET APPARAÎT AU SOMMET DE LA FENÊTRE PRINCIPALE. L'IMAGE CENTRALE REPRÉSENTE L'UNE DE CES VUES ET CORRESPOND À L'IMAGE ACTIVE PERMETTANT L'INITIALISATION DU MODÈLE. À GAUCHE, QUATRE POINTS, DONT TROIS CORRESPONDENT À LA BASE DU CÔNE ET UN AU SOMMET, SONT SÉLECTIONNÉS PAR L'UTILISATEUR. À DROITE, LE MODÈLE 3D INITIAL APPARAÎT PROJETÉ DANS L'IMAGE CENTRALE.

2.3.3 L'OPTIMISATION DU MODÈLE

Une fois le modèle initialisé, l'optimisation consiste en une déformation itérative du modèle 3D, avec un raffinement du maillage à chaque itération, de manière à satisfaire un critère basé sur une cohérence de texture multi-images.

2.3.3.1 Le vecteur d'inconnues

Soit un point $P(X, Y, Z)$ du modèle, sommet d'une facette i . On cherche quelle doit être sa coordonnée selon Z de telle manière que la projection de la facette i dans les images où elle est visible fournisse deux zones texturées qui satisfassent un critère de cohérence.

Cette définition suppose que la surface du modèle que nous souhaitons appréhender puisse être représentée par une fonction de type $z = f(x, y)$, ce qui sera généralement le cas pour les applications envisagées. Le vecteur de paramètres inconnus est donc composé de l'ensemble des coordonnées Z des points du modèle 3D. Pour une plus grande souplesse dans la déformation du modèle, on ajoute au vecteur les coordonnées x_0 et y_0 du sommet du cône :

$$\Phi = [x_0, y_0, z_0, z_1, \dots, z_p] \quad \text{Eq. 2.24}$$

2.3.3.2 Critère et méthode d'optimisation

Le critère d'optimisation

On se retrouve à nouveau devant le problème de l'estimation paramétrique d'un modèle, déjà évoqué dans le paragraphe concernant le calibrage du capteur.

L'objectif étant de reconstruire le plus fidèlement possible l'objet étudié, on définit un critère devant être minimisé afin que l'adéquation entre l'objet et le modèle générique soit la plus grande possible. Les éléments du vecteur Φ paramétrant la surface à reconstruire doivent être ajustés de manière à ce que le modèle 3D soit cohérent avec toutes les images, soit les données d'observation disponibles. Le critère choisi repose sur une cohérence de texture associée aux facettes du modèle 3D projetées dans plusieurs images. En effet, chaque facette du modèle est en effet visible dans un certain nombre d'images parmi les M autour de l'objet. La géométrie du modèle est calculée afin de minimiser, au sens des moindres carrés, l'erreur de projection de toutes les facettes dans les images où elles sont visibles. Le critère est le suivant :

$$C(\Phi) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{N_i-1} \sum_{k=j+1}^{N_i} [W_{jk} (V_{ij} - V_{ik})]^2 \right] \quad \text{Eq. 2.25}$$

Où :

- n est le nombre de facettes triangulaires.
- N_i est le nombre de vues sélectionnées pour une facette donnée i , avec $N_i \geq 2$. Se reporter au paragraphe suivant pour la sélection des vues
- V_{ij} et V_{ik} sont les vecteurs centrés et normés de luminance d'une facette i dans les deux images où la mesure est effectuée. Un vecteur centré signifie que le moyenne des éléments qui le composent est égale à 0 La normalisation signifie que l'écart-type est égal à 1.
- W_{jk} est un poids associé à chaque couple d'images utilisé, soit à chaque mesure.

On évoquera dans la suite du mémoire ce triangle sous l'appellation critère TRG (critère triangle).

Étant donné que V_{ij} et V_{ik} sont des vecteurs centrés et normés, le critère TRG peut également s'écrire comme suit :

$$C(\Phi) = \sum [W_{jk} (V_{ij} - V_{ik})]^2 = \sum [W_{jk}^2 (V_{ij}^2 + V_{ik}^2 - 2 \cdot V_{ij} \cdot V_{ik})] \quad \text{Eq. 2.26}$$

Avec

$$\sum (V_{ij}^2) = 1 \text{ et } \sum (V_{ik}^2) = 1, \text{ donc :}$$

$$C(\Phi) = 2 \cdot \sum [W_{jk}^2 (1 - V_{ij} \cdot V_{ik})] \quad \text{Eq. 2.27}$$

Ce critère correspond à une corrélation centrée normée entre deux vecteurs de luminance, critère classiquement utilisé en corrélation d'images (Garcia, 2001). Les schémas de la Figure 2-18 illustrent

cette corrélation et l'adaptation de la surface associée. Cette formulation mathématique (centrage et normalisation) permet de prendre en compte les variations affines de la lumière lors de l'acquisition d'images, c'est-à-dire les variations de la luminance moyenne et de la gamme de niveaux de gris entre les images.

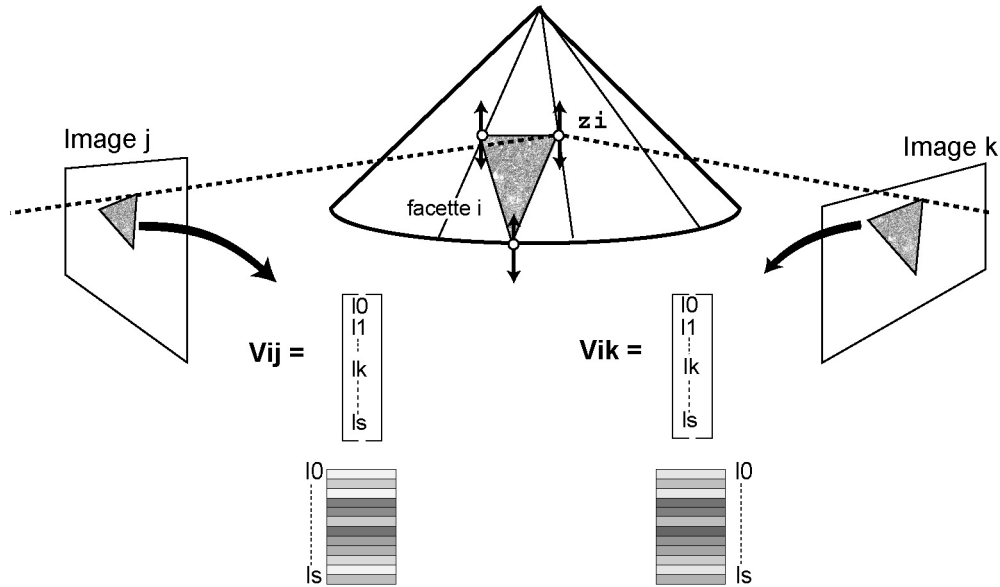


FIGURE 2-18 : ADAPTATION DE LA SURFACE ET REPRÉSENTATION D'UNE MESURE DU CRITÈRE TRG DE RECONSTRUCTION 3D : CORRÉLATION CENTRÉE NORMÉE D'UNE FACETTE I DANS UN COUPLE D'IMAGES. l_0, l_1, \dots, l_s SONT LES VALEURS DE LUMINANCE CENTRÉES ET NORMALÉES DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE D'UNE FACETTE I.

En d'autres termes, le processus consiste à optimiser une mise en correspondance déjà établie mais initialement grossière, issue de la projection du modèle 3D dans les images.

Un poids est attribué à chaque mesure du critère. Cette pondération est fonction de la géométrie externe des vues par rapport au modèle 3D, plus précisément par rapport à l'axe OZ du repère de l'objet (« verticalité » de la vue. Voir Figure 2-19). On décide de pénaliser les mesures prenant en compte les vues les plus « hautes » autour de l'objet. En effet, dans une telle configuration, la perception du relief est moins bonne que dans le cas des vues latérales. Une petite variation en Z d'un point du modèle ne modifiera alors que très peu la texture de la facette projetée dans une vue « haute » comparativement à une vue plus latérale, ce qui affecte le processus de convergence du système lors du processus d'optimisation décrit plus loin. Si par exemple un point du modèle « part » à l'infini selon Z , alors la variation de texture associée pour une vue du dessus sera faible, et donc le critère ne changera pas alors que la variation en Z est mauvaise...La pondération employée est la suivante :

$$W_{jk} = 1 - \left(\frac{\left\| \overrightarrow{C_j B_i} \cdot \overrightarrow{OZ} \right\| + \left\| \overrightarrow{C_k B_i} \cdot \overrightarrow{OZ} \right\|}{2} \right) \quad \text{Eq. 2.28}$$

Où C_j et C_k sont les centres des caméras j et k respectivement. B_i est le barycentre d'une facette i . \vec{OZ} est le vecteur normé correspondant à l'axe (OZ) du repère Objet (Figure 2-19).

Les deux cas extrêmes seraient ceux d'une mesure réalisée avec deux vues à axe optique horizontal (cas très favorables) et deux vues à axe optique vertical (cas défavorable). Ces deux cas sont illustrés Figure 2-20. Ainsi le poids est compris dans l'intervalle $[0 ; 1]$. Un mauvais cas de configuration des vues est pénalisé par l'attribution d'un poids faible (tendant vers 0) et inversement.

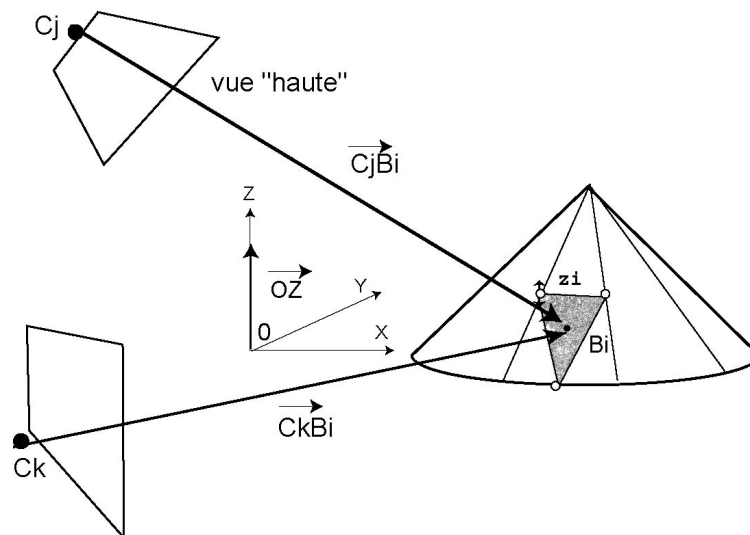


FIGURE 2-19 : PONDÉRATION DU CRITÈRE SELON LA GÉOMÉTRIE EXTERNE DES VUES. LES VUES « HAUTES » SONT PÉNALISÉES DANS LE CRITÈRE CAR ELLES SONT MOINS DISCRIMINANTES POUR UNE ESTIMATION ROBUSTE DE L'ÉLÉVATION DU MODÈLE.

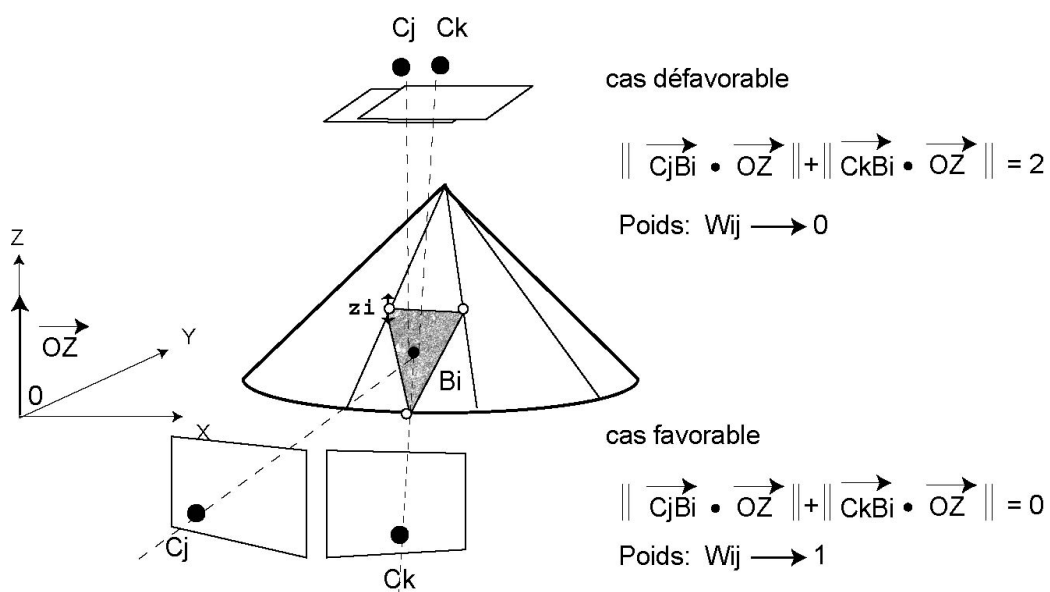


FIGURE 2-20 : CAS EXTRÊMES DANS LA PONDÉRATION DU CRITÈRE SELON LA GÉOMÉTRIE DES VUES.

Une étude approfondie de l'influence du poids n'a cependant pas été effectuée et serait nécessaire.

La méthode d'optimisation

Le critère étant non linéaire pour ses paramètres, une méthode d'optimisation itérative est employée : la méthode de Levenberg-Marquardt. Cette méthode est utilisée dans le processus de calibrage et a été présentée à cette occasion.

Le nombre total de mesures est $\sum_{i=1}^n (N_i - 1)$, avec n le nombre de facettes du modèle 3D et N_i le

nombre de vues sélectionnées pour la facette i . Le nombre de paramètres inconnus est $(P + 2)$, P étant le nombre de points de modèle 3D. Pour que le système soit surdéterminé, il faut que le nombre de mesures soit supérieur au nombre d'inconnues :

$$\sum_{i=1}^n (N_i - 1) \geq (P + 2).$$

Tel qu'est constitué le modèle 3D (Tableau 2-2) et sachant que, comme il va être vu au paragraphe suivant, chaque triangle est visible dans au moins deux vues, le système est toujours surdéterminé. Cependant, il peut y avoir certains cas de figures où il y a risque d'indétermination. Ces cas de figures apparaissent dans le cadre de stratégies mises en place permettant (1) l'élimination de mesures aberrantes en amont du processus d'optimisation, et permettant (2) une plus grande souplesse dans l'utilisation de la méthode, notamment en ce qui concerne l'acquisition des vues et la visibilité du modèle (optimisation partielle du modèle par exemple). Ces situations seront discutées plus loin (paragraphe 2.3.3.5).

L'utilisation d'une telle méthode d'optimisation non linéaire nécessite des conditions initiales relativement proches de la solution. Il est donc a priori important que le modèle 3D initial soit géométriquement proche du modèle réel pour garantir une bonne convergence du système, faisant de l'étape d'initialisation du modèle 3D une étape cruciale du processus de reconstruction.

On peut remarquer que le nombre d'inconnus et de paramètres à optimiser devient important quand la résolution du modèle augmente. Pour une résolution $R = 4$ par exemple, le nombre de points est supérieur à 1000 et le nombre de facettes supérieur à 2000 (Tableau 2-2). En supposant par exemple que chaque facette est visible dans deux vues, cela conduit au calcul d'une matrice Jacobienne de taille au moins égale à 1000×4000 . A la résolution supérieure, l'optimisation du modèle n'est actuellement pas envisageable : la matrice Jacobienne à calculer serait au moins de taille 4000×16000 ! Ceci pose le problème d'une limite de calcul de part le temps de convergence impliqué et surtout de la capacité de calcul requise du système informatique. Dans notre cas, ce temps de convergence pourrait cependant être en partie réduit sachant que le calcul de la matrice Jacobienne n'est pas optimisé : en effet, chaque variation en Z d'un point p du modèle ne va influencer que sur une partie restreinte de celui-ci, signifiant que la matrice Jacobienne est en grande partie creuse (éléments nuls au sein de la matrice). Une stratégie d'accélération du calcul de la matrice est

quand même mise en place dans le processus d'optimisation. Celle-ci consiste à ne pas recalculer les dérivées composant la matrice Jacobienne quand cela n'est pas nécessaire, c'est à dire quand par exemple la dérivée est fonction d'un triangle et d'un point non directement liés (un sommet est lié à 3, 6 ou 8 triangles). Des méthodes d'optimisation traitant du cas particulier des matrices creuses existent mais n'ont pas été employées dans notre approche de reconstruction. Elles constituent cependant une piste pour l'amélioration du code développé.

2.3.3.3 Mise en correspondance : sélection des images et échantillonnage des facettes

2.3.3.3.1 Choix des facettes et des images pour l'optimisation

Dans un premier temps, pour chaque facette du modèle maillé, on sélectionne les vues dans lesquelles la mise en correspondance sera effectuée. Cette sélection repose sur plusieurs tests, schématisés Figure 2-21 :

Test 1 : la visibilité de la facette dans les vues est testée. Ce test repose sur la projection du barycentre de la facette dans les images.

Test 2 : il concerne l'orientation de la facette par rapport à une vue donnée. Le test consiste à calculer le produit scalaire entre la normale à la facette et le vecteur centre optique d'une image/ barycentre de la facette. A l'issue de ce test, un certain nombre de vues ont été sélectionnées, et une vue de « référence » est choisie. Cette vue est celle pour laquelle la facette est la mieux orientée. Chaque mesure du critère TRG associée à une facette i du modèle prend en compte cette vue de « référence » selon le schéma de la Figure 2-21.

Test 3 : l'angle entre les axes optiques de la vue de référence et des autres vues sélectionnées est testé. Il s'agit plus exactement de l'angle formé par le barycentre de la facette et le centre optique du capteur à deux points de vues différents. Un intervalle est défini pour cet angle afin d'éviter la sélection de vues présentant un angle de triangulation trop faible ou bien présentant une différence trop importante de la texture pour une facette donnée (cas d'un angle important). Les valeurs de ces bornes sont déterminées de manière empirique : on choisit des vues dont l'angle est compris entre 8° et 60° , sachant que la configuration d'acquisition des vues est telle qu'elles sont en général espacées de plus de 30° .

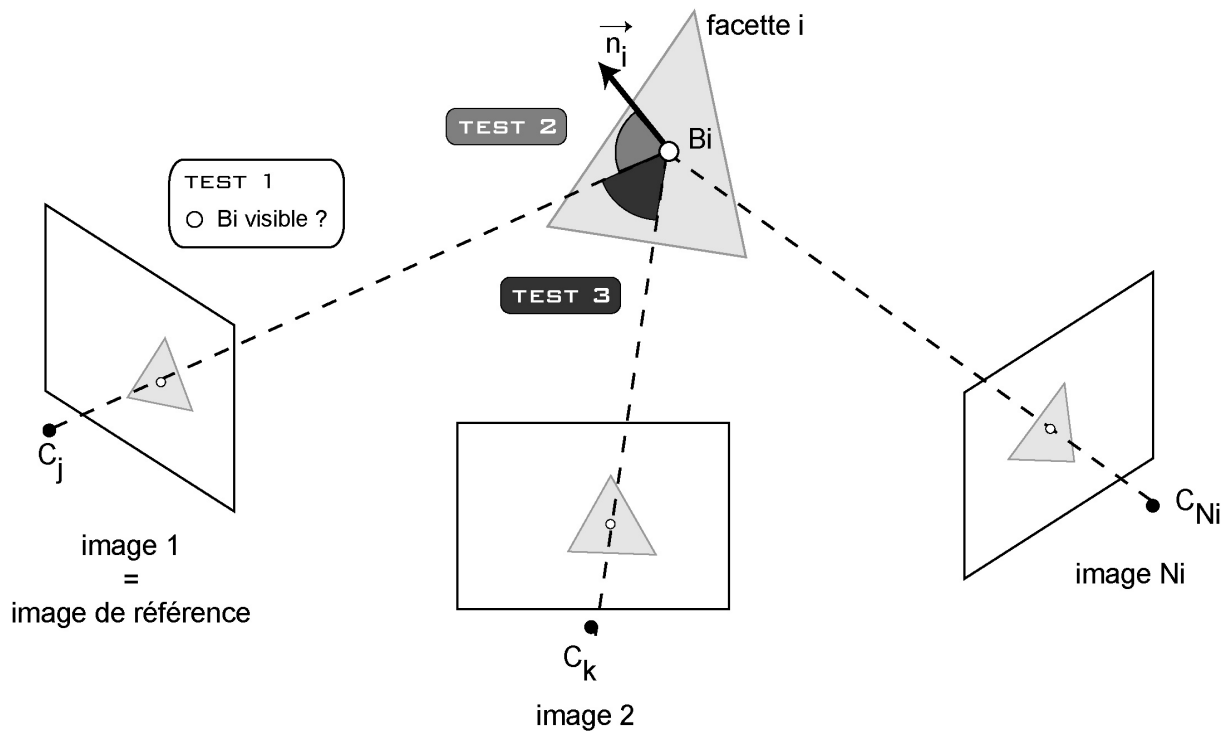


FIGURE 2-21 : SÉLECTION DES VUES POUR UNE FACETTE i DONNÉE EN VUE DE L'ÉTABLISSEMENT DU CRITÈRE TRG. TROIS TESTS SONT RÉALISÉS : ON TESTE (1) LA PROJECTION DU BARYCENTRE DANS L'IMAGE, (2) L'ANGLE ENTRE LA NORMALE À LA FACETTE ET LE RAYON OPTIQUE D'UNE IMAGE PASSANT PAR LE BARYCENTRE DE LA FACETTE, (3) L'ANGLE ENTRE DEUX VUES.

A ce stade, N_i vues ont été sélectionnées pour la facette i . Chaque facette peut être mise en correspondance dans deux images au moins. Si l'on dispose de plus de deux images pour chaque facette, alors la mise en correspondance se fera par couples d'images, entre la vue de référence et une des images sélectionnées (Figure 2-22). Le nombre de mesures pour chaque facette i sera alors égal à $N_i - 1$.

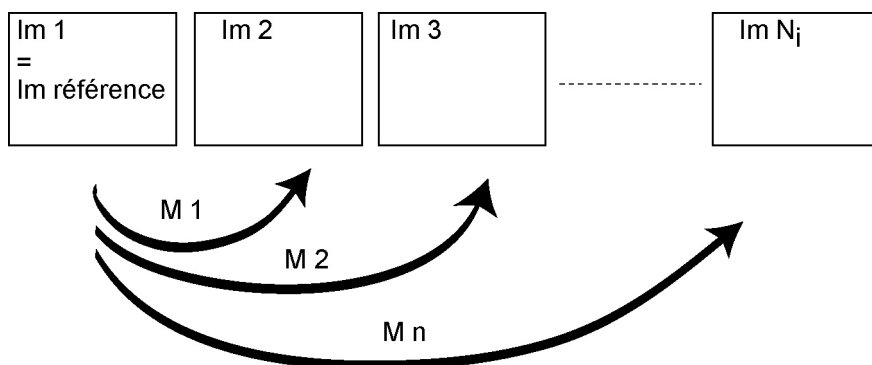


FIGURE 2-22 : VUES SÉLECTIONNÉES ET MISE EN CORRESPONDANCE POUR UNE FACETTE i . M_1 , M_2 ET M_n SONT LES MESURES ISSUES DE LA MISE EN CORRESPONDANCE DANS N_i IMAGES SÉLECTIONNÉES POUR UNE FACETTE i DONNÉE.

Le nombre de vues sélectionnées pour chaque facette est contraint car le nombre de mesures pourrait rapidement devenir important, ce qui se traduirait par une augmentation considérable du temps de calcul. Les résultats de reconstruction figurant dans ce mémoire sont réalisés avec un maximum de 3 images par facette, soit 2 mesures possibles par facette selon le critère choisi. Le nombre maximum de vues sélectionnées pour chaque facette peut cependant être modifié aisément dans le code pour une application donnée.

Cette étape est critique dans le processus de reconstruction. Elle conditionne en effet les mesures composant le critère. Une sélection correcte des images pour chaque facette est nécessaire, sous peine d'introduire d'importantes perturbations dans le résultat final de reconstruction, voire même d'amener le processus d'optimisation à diverger.

Dans certains cas d'application, il se peut qu'une facette i ne soit pas visible dans deux images au moins à l'issue de la série de tests de cette étape de sélection. On décide alors de ne pas prendre en compte une telle facette dans le processus d'optimisation. Le nombre d'inconnues n'est alors plus l'ensemble des points P du modèle 3D, mais un sous-ensemble de ces points, et le nombre de

mesures n'est plus $\sum_{i=1}^n (N_i - 1)$, mais $\sum_{i=1}^{n'} (N_i - 1)$, avec n' un sous-ensemble des facettes du

modèle 3D. Cela confère plus de souplesse concernant l'utilisation de la méthode de reconstruction : une reconstruction partielle de l'objet est alors possible si par exemple les images acquises ne couvrent qu'une partie de sa surface.

2.3.3.3.2 Échantillonnage des facettes

On dispose de N_i vues pour chaque facette du modèle 3D. Les vecteurs de luminance V_{ij} et V_{ik} composant le critère d'optimisation proviennent de l'échantillonnage des facettes dans chaque image sélectionnée (Figure 2-18). La taille de ces vecteurs est fonction de la résolution du modèle et est variable selon chaque facette : pour chaque facette i , un échantillonnage 3D est en effet calculé à partir de la surface moyenne du triangle projeté dans les diverses images sélectionnées. Le nombre de points d'échantillonnage peut atteindre plusieurs milliers pour la résolution la plus basse. Une borne maximum ($B_{\max} = 1275$) et minimum ($B_{\min} = 15$) définies empiriquement sont établies pour garantir un échantillonnage minimal de chaque facette nécessaire dans l'optimisation, ainsi que pour ne pas avoir affaire à des vecteurs de luminance trop grands, ce qui n'est pas forcément intéressant pour l'efficacité de la mise en correspondance et coûteux en temps de calcul.

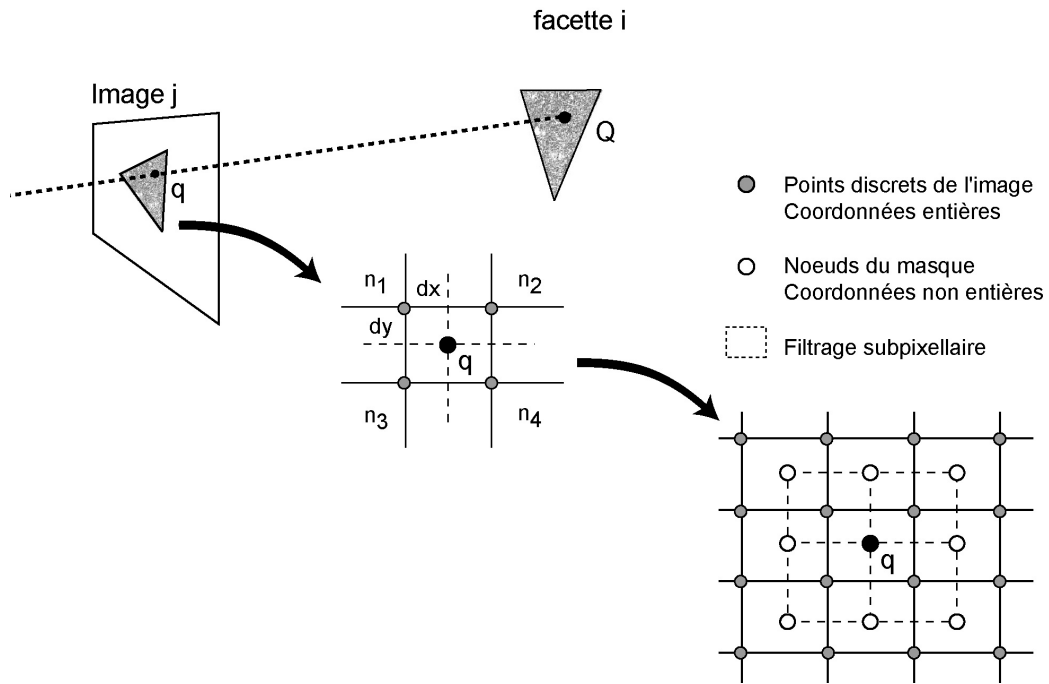


FIGURE 2-23 : ÉCHANTILLONNAGE DES FACETTES PROJÉTÉES DANS LES IMAGES ET FILTRAGE DES MESURES DU CRITÈRE D'OPTIMISATION TRG.

L'échantillonnage 3D des facettes implique un échantillonnage dans l'image en coordonnées non entières, or les images numériques sont des représentations discrètes. Il est donc nécessaire d'interpoler, de manière sous-pixellique, les valeurs de luminance des points échantillonnés dans l'image. Soit un point d'échantillonnage tridimensionnel Q d'une facette i et sa projection q_{xy} dans l'image (coordonnées sub-pixellaires). La luminance $I_{q_{xy}}$ d'un point q_{xy} est calculée par une interpolation bilinéaire $IB(q)$ des quatre points discrets voisins n_1, n_2, n_3, n_4 :

$$IB(q) = (1 - dy) \cdot (1 - dx) \cdot n_1 + (1 - dy) \cdot dx \cdot n_2 + dy \cdot (1 - dx) \cdot n_3 + dx \cdot dy \cdot n_4 \quad \text{Eq. 2.29}$$

Où dx et dy correspondent à la partie non entière des coordonnées du point q_{xy} selon x et y (Figure 2-23).

Plutôt que de réaliser une mesure ponctuelle pour $I_{q_{xy}}$, on moyenne l'information en propageant un masque de filtrage dont la dimension s est liée à la résolution du modèle reconstruit (la taille du filtre diminue quand la résolution augmente). La mesure est effectuée en maintenant le calcul bilinéaire pour tous les noeuds du masque (Figure 2-23) :

$$I_{q_{xy}} = \frac{1}{(2 \cdot s + 1)^2} \cdot \sum_{i=-s}^s \sum_{j=-s}^s (IB((I_{q_{x+j}}, I_{q_{y+i}}))) \quad \text{Eq. 2.30}$$

Avec i et j les indices des lignes et des colonnes. Le filtrage permet de moyenniser l'information, ce qui facilite la mise en correspondance. D'autres types d'interpolation existent et peuvent être implantés dans le code. C'est le cas des interpolants de type B-spline dont les nombreux avantages ont été récemment soulignés (Garcia, 2001).

La dimension sub-pixellaire de la mesure est cruciale pour la convergence du dispositif. En effet, la routine d'optimisation de Levenberg-Marquardt estime de façon discrète la mesure du Jacobien à une itération r de l'optimisation. Pour cela la procédure évalue la variation globale du critère pour une variation infime de chaque inconnue Φ_j du vecteur Φ . Cette variation infime se traduit par un déplacement du point projeté dans une image de quelques dixièmes de pixel. Celui-ci doit nécessairement être perceptible et se traduire par une variation de la mesure, d'où la nécessité d'une mesure sub-pixellaire.

2.3.3.4 Un critère secondaire

Un second type d'optimisation est défini. Le critère employé est toujours basé sur une cohérence de texture multi-images, mais concerne cette fois chaque point p de manière indépendante, et non plus toutes les facettes du modèle 3D simultanément (Figure 2-24). Le passage du critère TRG à ce deuxième critère (critère PT) permet d'affiner la reconstruction en fin de processus. En effet, on a vu que pour une résolution élevée du modèle ($R=5$), le nombre de paramètres et de mesures devient trop important pour réaliser une optimisation selon le critère TRG. On décide alors d'optimiser chaque point de manière indépendante, avec le vecteur de paramètres inconnus suivant :

$$\Phi = (\alpha, \beta, z) \quad \text{Eq. 2.31}$$

$\vec{n}(n_x, n_y, n_z)$ étant la normale au point P, α est le site de la normale ($\arctan \frac{n_y}{n_x}$), β est son azimut ($\arcsin n_z$) dans le repère Monde, et z est la coordonnée en Z du point P (Figure 2-25).

Le critère PT s'écrit comme suit :

$$C(\Phi) = \sum_{i=1}^{Np-1} \sum_{j=i+1}^{Np} (V_i - V_j)^2 \quad \text{Eq. 2.32}$$

Avec :

- Np le nombre d'images où le point P est visible, où $Np \leq Np_{\max} = 5$.
- V_i et V_j les vecteurs de luminance centrés et normés correspondants à l'échantillonnage d'une fenêtre de taille x dans les images i et j . La taille de la fenêtre, choisie empiriquement, varie selon la résolution du modèle (exemple : pour $R=5$ ou $R=6$, utilisation d'une fenêtre 9×9). L'échantillonnage est réalisé de manière à correspondre à un pas de $1 \times \mu$ pixels dans l'image, μ étant un facteur empirique fixé à 2,5.

Le système lors d'une optimisation non linéaire est dans ce cas petit, car chaque point est optimisé de manière indépendante, ce qui n'est pas le cas de l'optimisation du critère TRG pour de grandes résolutions du modèle.

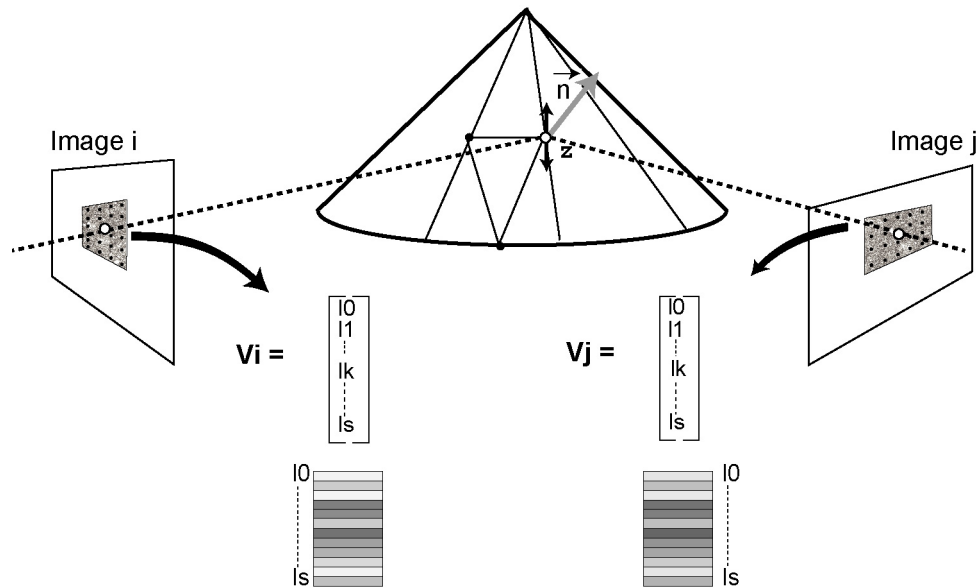


FIGURE 2-24 : ADAPTATION DE LA SURFACE ET REPRÉSENTATION D'UNE MESURE DU CRITÈRE PT: CORRÉLATION CENTRÉE NORMÉE D'UNE FENÊTRE AUTOUR D'UN POINT P, DANS UN COUPLE D'IMAGES I,J. L_0, L_1, \dots, L_s SONT LES VALEURS DE LUMINANCE CENTRÉES ET NORMÉES DES POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE DE LA FENÊTRE.

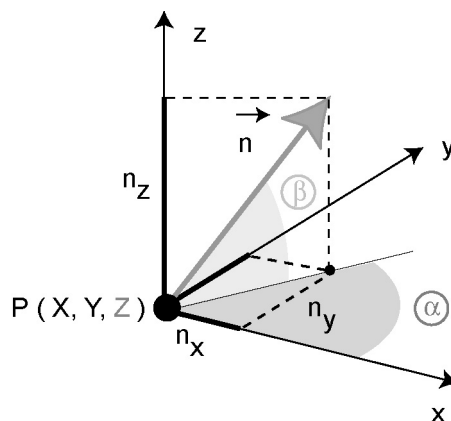


FIGURE 2-25 : LES INCONNUES DE L'OPTIMISATION SELON LE CRITÈRE PT : α, β ET Z (EN GRIS).

2.3.3.5 Élimination des mesures perturbantes

L'optimisation non linéaire du critère TRG selon la routine de Levenberg-Marquardt nécessite des conditions initiales relativement proches de la solution. L'initialisation du modèle 3D et le choix des vues pour chaque facette conditionnent ces valeurs initiales. Si le modèle 3D initial est trop éloigné du modèle réel, même partiellement, ou si le choix des vues n'est pas correct malgré la procédure de sélection contrôlée, des mesures perturbant la convergence du système peuvent apparaître. Pour éviter ce type de situation, on décide de mettre en place une stratégie de filtrage de ces mesures perturbantes en amont de l'optimisation, ainsi qu'un filtrage des erreurs grossières en fin de procédure. Les deux procédures sont semi-automatiques.

Tout d'abord, une procédure de pré-optimisation permet de passer en revue toutes les mesures de corrélation à l'issue de la sélection des vues pour chaque facette, et de filtrer les mesures supérieures à un certain seuil S_1 . Ce seuil est fixé par l'utilisateur au cours de la procédure, au vu de la distribution des mesures (selon un histogramme de fréquences). Il se peut alors que certaines facettes et certains points du modèle ne soient alors plus pris en compte dans l'optimisation qui suit.

Cette procédure peut éventuellement perturber le système d'optimisation si le nombre de vues maximum par triangle est petit. En effet, dans le cas de deux vues maximum par triangle (soit une mesure par triangle), il peut arriver que le système devienne indéterminé si le filtrage des mesures est trop important

On met également en place en fin d'optimisation une procédure permettant de ne pas remettre à jour certaines inconnues (coordonnées Z des points du modèle) dans le cas où :

(1) les mesures résiduelles qui leur sont associées dépassent un certain seuil S_2 défini selon la distribution de l'ensemble des données (mesures résiduelles), c'est-à-dire si les mesures résiduelles sont estimées trop mauvaises. S_2 , comme S_1 , est défini manuellement par l'utilisateur d'après la distribution des mesures résiduelles.

(2) la variation en Z du point est anormalement grande ($\Delta Z \geq 1.25 \times Z_{initial}$).

Dans de bonnes conditions (configuration des vues et initialisation du modèle 3D), la convergence du système est assurée et les seuils de ces deux procédures sont choisis de manière à ne filtrer aucune mesure. Une automatisation du choix de ces seuils selon une analyse statistique des mesures serait cependant souhaitable, mais n'a pas constitué en premier lieu une de nos priorités.

2.4 EXEMPLE DE RECONSTRUCTION : CÔNES STATIQUES

La méthode de reconstruction a été développée sur des modèles analogiques correspondant à des cônes de sable et de plâtre statiques. Les résultats de reconstruction obtenus sur ce type de modèle sont présentés dans la Figure 2-26.

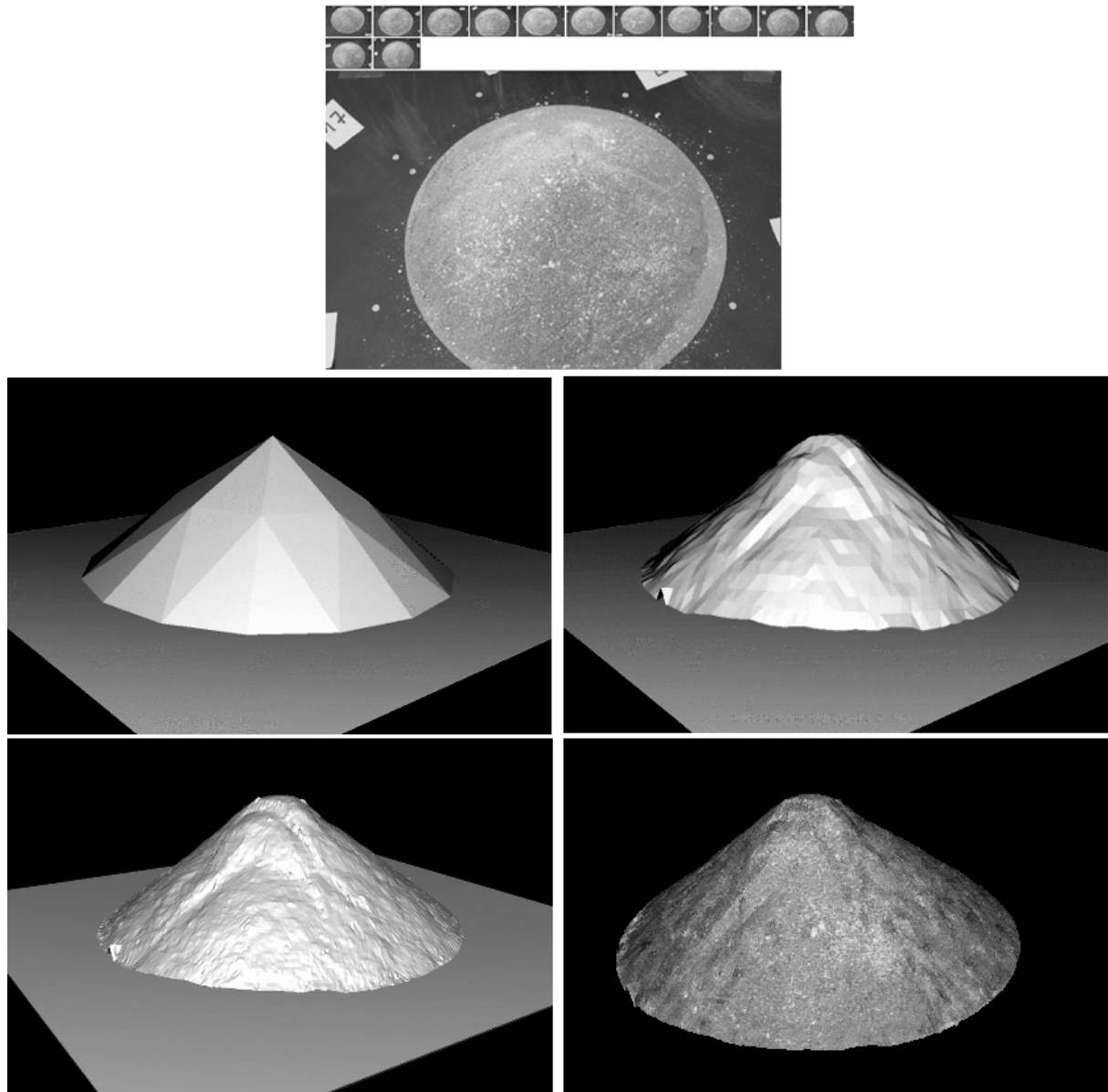


FIGURE 2-26 : RÉSULTATS DE RECONSTRUCTION D'UN CÔNE STATIQUE À DIFFÉRENTES RÉOLUTIONS. EN HAUT FIGURENT DEUX IMAGES PARMIS LES 12 DISPONIBLES UTILISÉES POUR LA RECONSTRUCTION. DES IMAGES DE LA RECONSTRUCTION À $R=1$ (32 FACETTES), $R=4$ (2048 FACETTES) ET $R=6$ (32768 FACETTES) APPARAISSENT, AINSI QUE LE MODÈLE 3D ET LA TEXTURE RÉELLE DU CÔNE REPROJETÉE.

D'un point de vue expérimental, la surface reconstruite s'avère suffisamment précise pour mettre en évidence les structures morphologiques caractéristiques du cône réel, à savoir deux effondrements emboîtés sur l'un des flancs. Cette figure, provoquée par une vibration accidentelle du support du modèle, apparaît même à une résolution du cône assez faible ($R=4$), alors qu'à une résolution supérieure ($R=6$), les irrégularités de la surface dues à l'écoulement granulaire sont visibles. Ce dernier trait morphologique est lié au mode de construction du cône de sable (utilisation d'un entonnoir sans saupoudrage final du modèle).

2.5 MESURES DE PRÉCISION

Une façon de calculer la précision de reconstruction consiste à estimer l'incertitude des points reconstruits à l'aide du calcul de la matrice de covariance lors du processus d'optimisation (la matrice inverse du développement limité à la dernière itération de Levenberg-Marquardt). Cela est connu sous le nom de valeur d'incertitude a posteriori (Lavest et al., 1998). Cependant cette façon de procéder ne fournit pas de précision « terrain ». Elle correspond en quelque sorte à la performance du processus d'optimisation, mais reste néanmoins intéressante car elle fournit une indication de précision des points reconstruits propre à chaque reconstruction.

Une autre façon de tester la précision de la méthode de reconstruction a été choisie : l'utilisation d'objets étalons proches du type de modèles étudiés. Deux expériences ont été réalisées. La première expérience teste la précision de reconstruction grâce à un cône en PVC de dimensions connues (Figure 2-27). Une texture est obtenue par projection d'une peinture claire sur un fond sombre. Le test de précision consiste à calculer, au sens des moindres carrés, la surface conique passant par tous les points reconstruits, ce qui permet de :

- (1) comparer la géométrie du cône reconstruit avec celle du cône réel en PVC (angle sommital par exemple).
- (2) calculer l'écart-type de la distance entre les points 3D reconstruits et la surface théorique passant par ces points.

L'écart-type calculé dans le cas de cette première expérience est de 3.10^{-4} m. pour une distance caméra / objet de 0.5 m, et l'angle sommital est retrouvé à quelques dixièmes de degrés près, ce qui correspond à la précision angulaire d'usinage du cône en PVC qui est de 0.33° (Tableau 2-3).

Il faut noter que ce résultat est extrêmement dépendant de la texture du cône. Pour le cas présenté, la texture est en effet trop grossière (importantes zones homogènes) pour obtenir une plus grande précision de reconstruction, et de meilleurs résultats de reconstruction sont attendus si l'information texturale du cône est plus dense.

Pour vérifier cette sensibilité de la précision de reconstruction à la texture, nous avons réitéré l'expérience en utilisant cette fois un cône en aluminium (Figure 2-27) présentant une texture plus fine (Figure 2-28). Les différentes reconstructions du nouveau cône sont de meilleure qualité, et, dans les mêmes conditions (distance de prise de vue d'environ 0,5 m, nombre d'images et optique semblables), l'écart-type calculé est de $4,5.10^{-5}$ m, soit un ordre de grandeur supérieur à celui obtenu précédemment (Tableau 2-3). Cette précision correspond à 1/11111 du champ, ce qui conduit à des corrélations sub-pixellaires d'environ 0,2 pixels. Étant donné la résolution physique de la matrice CCD couleur du capteur Nikon D1 (2000x1312), cette précision indique que nous sommes proches des limites physiques du matériel.

L'angle sommital est retrouvé dans cette 2^{ième} expérience à 0,01° degrés près (cas d'une reconstruction avec une distance de prise de vue de 0,3 m.), sachant que la précision angulaire d'usinage est dans ce cas d'une minute (1/60°).

	Écart-type (m.) pour une distance caméra / objet de 1m	Angle sommital réel – angle sommital reconstruit (degrés)	Précision angulaire d'usinage (degrés)
Cône PVC	6.10^{-4}	0,2 – 0,38	0,33
Cône Aluminium	9.10^{-5}	0,01	0,017

TABLEAU 2-3 : RÉSULTATS DE PRÉCISION DE LA RECONSTRUCTION 3D ISSUS DE L'UTILISATION DE DEUX OBJETS ÉTALONS (CÔNE PVC ET CÔNE ALUMINIUM). L'ÉCART-TYPE DE LA DISTANCE DES POINTS 3D RECONSTRUITS À LA SURFACE CONIQUE PASSANT PAR TOUS LES POINTS EST DONNÉ, AINSI QUE L'ANGLE SOMMITAL RECONSTRUIT ET LA PRÉCISION ANGULAIRE D'USINAGE DU CÔNE.

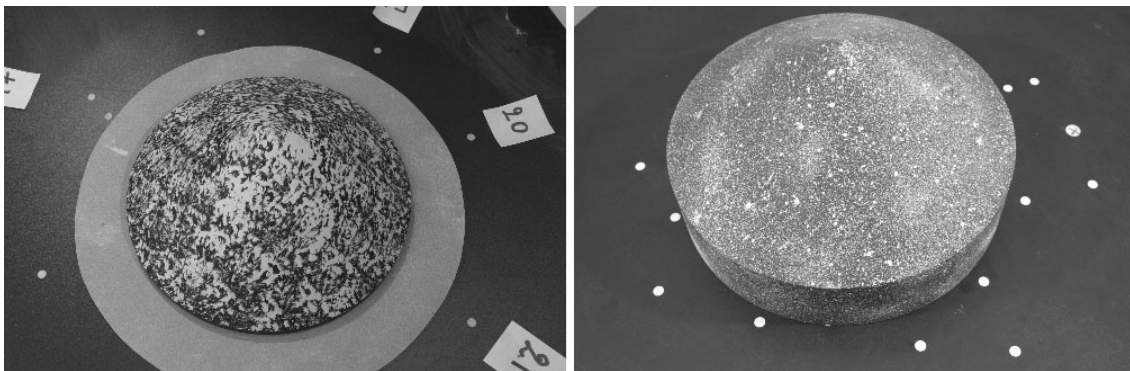


FIGURE 2-27 : PHOTO DES CÔNES EN PVC (1^{ÈRE} EXPÉRIENCE) ET EN ALUMINIUM (2^{ÈME} EXPÉRIENCE).UTILISÉS POUR TESTER LA PRÉCISION DE RECONSTRUCTION.

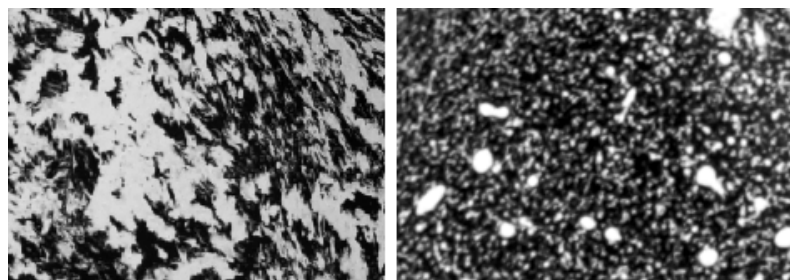


FIGURE 2-28 : DÉTAIL DE LA TEXTURE DU CÔNE EN PVC ET DE LA TEXTURE PLUS FINE DU CÔNE EN ALUMINIUM.

La précision de reconstruction 3D dont il est question ici englobe le processus de calibrage car les données issues de celui-ci sont utilisées dans le processus.

3 TRAVAUX DE RECONSTRUCTION EN LABORATOIRE

3.1 LES MODÈLES ANALOGIQUES ÉTUDIÉS

3.1.1 INTRODUCTION

La méthode de reconstruction présentée dans le chapitre précédent a été développée sur des modèles analogiques statiques et selon une configuration expérimentale unique (Figure 2-2 chapitre 2). Pour permettre la validation de la technique et préciser son champ d'application en volcanologie expérimentale, une série d'expériences analogiques a été menée en laboratoire et a fait l'objet de reconstructions 3D. Ces expériences concernent la déformation des édifices volcaniques et mettent ainsi en jeu des modèles dynamiques. Une analyse de la déformation dans le temps est alors rendue possible grâce à des reconstructions successives, ce qui constitue un aspect fondamental de l'application de la méthode en laboratoire.

Trois objectifs principaux se dégagent donc de ces travaux en laboratoire :

- Tester la reconstruction sur des modèles de géométries différentes.
- Tester la flexibilité d'utilisation de la méthode en laboratoire.
- Apporter une information quantitative concernant la déformation des modèles, nécessaire dans le cadre d'études volcano-tectoniques en cours.

3.1.2 LES EXPÉRIENCES

Quatre types d'expériences, pouvant être regroupées selon trois principaux thèmes, ont été réalisées. Trois d'entre elles font référence à des travaux en cours menés par des chercheurs de l'Open University (Angleterre), et du Laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand, et ont été

effectuées dans le cadre d'une collaboration (Wooller et al., 2003). Les expériences peuvent être classées en fonction des axes suivants:

(1) La déformation gravitaire des édifices au « cœur » altéré. Nous avons choisi de présenter dans ce mémoire une série d'expériences complète visant à étudier la déformation d'un édifice volcanique renfermant un corps de moindre résistance, issu de l'altération des roches par l'activité hydrothermale. Ces travaux ont débuté quatre ans auparavant et ont été finalisés lors de cette thèse. Cette étude constitue une application directe de la méthode de reconstruction en laboratoire. Le **paragraphe 3.2** est à ce titre présenté sous la forme d'un article, soumis au Bulletin of Volcanology, et synthétise l'ensemble du projet.

(2) Le phénomène d'étalement d'un volcan. Deux types d'expériences sont réalisés. Une série d'expériences concerne les phénomènes d'étalement et d'affaissement des volcans liés à la présence d'un substratum ductile, et font référence aux travaux de van Wyk de Vries et al. (van Wyk de Vries et al., 2003). Un deuxième type d'expériences développé par Murray (Murray, 2002) concerne l'étalement d'un édifice particulier : l'Etna (Italie).

(3) La déformation d'un édifice en régime d'extension. Il s'agit d'expériences réalisées par Wooller et al. (Wooller et al., 2003) dans lesquelles un édifice est déstabilisé par la présence de failles dans le substratum sur lequel il repose.

Une synthèse des ces travaux en laboratoire est présentée dans ce chapitre.

Ces diverses expériences présentent des configurations géométriques distinctes, qui nécessitent l'utilisation de modèles initiaux différents dans le processus de reconstruction. La dimension des modèles est décimétrique à métrique, comme pour les modèles analogiques statiques. Des matériaux analogues similaires sont également employés (sable, plâtre, farine, silicone), ce qui permet d'assurer une texture riche dans les photographies des modèles, nécessaire au bon fonctionnement du processus de reconstruction. L'amplitude maximale des déformations observées est de l'ordre du centimètre.

3.1.3 SUIVI DE LA DÉFORMATION

Le suivi de la déformation est réalisé grâce à la comparaison de reconstructions 3D à des temps successifs. Cette comparaison permet de connaître la déformation en Z des modèles. Les MNT successifs sont en effet tous référencés par rapport au même repère Objet. Initialement, un maillage régulier des modèles était prévu afin de pouvoir comparer directement les reconstructions si celles-ci étaient réalisées à partir d'un même modèle initial. En effet, les variations en Z d'un modèle à l'autre sont dans ce cas extraites aisément par une simple différence entre les nœuds d'une grille XY commune. Dans la pratique, la grille XY n'est pas la même pour deux modèles successifs : le sommet du modèle peut en effet bouger dans les trois directions de l'espace afin de conférer plus de souplesse au processus de reconstruction (adaptation de la surface). Cela produit, par subdivisions successives, une irrégularité du maillage pour la partie sommitale du modèle, propre à chaque

reconstruction. L'irrégularité du maillage peut également provenir de l'utilisation de modèles initiaux présentant des facettes de différente taille (facettes définies par l'opérateur de manière interactive dans le logiciel), permettant de s'adapter simplement aux différentes configurations géométriques testées. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer une interpolation des reconstructions afin d'obtenir des grilles régulières directement comparables. Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus d'un re-échantillonnage des reconstructions 3D, réalisé avec le logiciel SURFER (Surface Mapping System, Golden Software Inc.). Ce dernier propose divers types d'interpolation des données (points 3D) permettant la création d'une grille régulière, puis la visualisation de la surface du modèle en 2D ou 3D. L'interpolation utilisée pour nos données de reconstruction 3D est basée sur une triangulation de Delaunay (« Triangulation with Linear Interpolation »), et a été choisie en raison de la distribution spatiale relativement régulière de nos données, et car elle correspond à une interpolation dite exacte (par opposition à une interpolation avec lissage). Une dernière remarque doit être faite concernant cette interpolation : Soit un modèle reconstruit composé de 16641 points. Une grille régulière 129x129 correspondrait au même nombre de points. Cependant il est nécessaire de sur-échantillonner lors de l'interpolation car le modèle reconstruit est initialement composé de facettes triangulaires, donc de petites surfaces. Le réduire à un nombre de points donné (sommets des facettes) entraîne une perte d'information. Une grille de 129x129 n'est donc pas équivalente à un modèle reconstruit de plus de 16000 points : il faut une grille comportant plus de points, avec la seule contrainte que le nouveau pas d'échantillonnage ne soit pas inférieur au pixel. Si par exemple la surface moyenne des facettes du modèle 3D projeté dans les images est de 13 pixels² (soit un triangle équilatéral de 5 pixels de côté), alors la nouvelle grille ne devra pas excéder la taille $(5 \times 129) \times (5 \times 129)$. Figure 3-1 illustre le mode opératoire du suivi de la déformation.

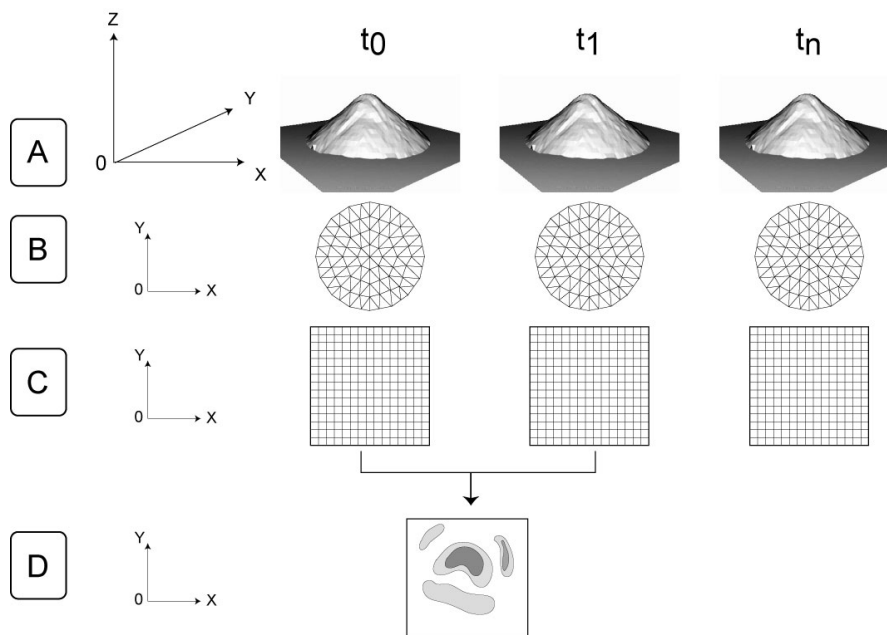


FIGURE 3-1 : SUIVI DE LA DÉFORMATION D'UN MODÈLE ANALOGIQUE. LES RECONSTRUCTIONS SUCCESSIVES (A) PERMETTENT L'ÉTUDE DES VARIATIONS EN Z DU MODÈLE. UNE GRILLE RÉGULIÈRE (C) EST CRÉÉE POUR CHAQUE RECONSTRUCTION 3D À PARTIR DU MAILLAGE ORIGINAL

(B). UNE CARTE DE DÉFORMATION SELON Z (D) PEUT ÊTRE OBTENUE PAR SOUSTRACTION DE DEUX MNT.

3.2 DÉFORMATION GRAVITAIRE DES VOLCANS AU « CŒUR » ALTÉRÉ

Le paragraphe est sous forme d'un article, soumis à *Bulletin of Volcanology*.

Flank spreading and collapse of weak-cored volcanoes

EMMANUELLE CECCHI (1), BENJAMIN VAN WYK DE VRIES (1), JEAN-MARC LAVEST (2)

(1) *Laboratoire Magmas et Volcans, UMR6524 du CNRS, OPGC, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.*

(2) *LASMEA, UMR 6602 du CNRS, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.*

Email Cecchi@opgc.univ-bpclermont.fr

ABSTRACT

Volcanoes subjected to hydrothermal activity develop weak cores as a result of alteration and due to elevated pore pressures. Edifices constructed at the angle of repose of volcanoclastics, or even more gentle slopes respond to internal weakening by initially deforming slowly, but may then collapse catastrophically. Such a process has yet been described for only a few volcanoes, such as Casita, Nicaragua, however the conditions for flank spreading are widespread and many, if not most volcanoes should suffer some alteration-related flank spreading. We provide analogue models that characterise the structure, and surface deformation fields and internal structure of a spreading flank. Deformation creates a characteristic concave-convex-concave flank profile producing structures such as basal thrusts, summit normal faults, grabens and strike-slip relay faults. Three deformation regimes are found: a 'pit collapse' regime is associated with very small volumes of ductile material located far from the edifice surface. This would not appear in nature, as time for deformation is greater than the lifetime of a volcano, unless very low rock viscosities are present. The other two regimes are flank spreading regimes, one symmetric and one asymmetric. The latter is the most common, as most volcanic structures are asymmetrical in form and in distribution of physical properties. The deformation is controlled by the altered region dimensions, volume and position relative to the edifice, and in a lesser extent by its shape. As the flanks spread, landslides are created, initially on the steepened portion, but also from fault scarps. Major flank collapse may occur

leading to explosive hydrothermal decompression and to a debris avalanche rich in hydrothermally altered material. We provide several new examples of volcanoes that have structures and morphology compatible with flank spreading. We suggest that it is a common feature, important in the tectonics and hazards of many volcanoes.

Keywords

Gravitational deformation, analogue modelling, hydrothermal alteration, edifice weakening, flank spreading, volcano instability, collapse.

Introduction

The 1998 landslide and lahar of Casita volcano, Nicaragua, prompted us to re-examine the edifices morphology and structure, leading to the discovery of flank spreading caused by hydrothermal alteration (van Wyk de Vries et al., 2000). This paper proposed that volcanic edifices are initially built at the angle of repose of scoria, pyroclastics, and by lava accumulation, leading to a stable construction. However, continual hydrothermal activity reduces the strength of fresh rock, especially clay alteration and raises pore pressures (Day, 1996, Voight and Elesworth, 1997). This alteration leads to mechanically unstable edifice that deforms until catastrophic collapse, or a stable shape is regained. A catastrophic failure potential is directly associated with this kind of situation, and numerous examples in nature underline the frequent link between altered materials and flank failures (Wallace and Waythomas, 1999, Komorowski, Norton, et al., 1999, Siebert, 1984, Siebert, Glicken, et al., 1987, Swanson, Hausback, et al., 1995) making this deformation of particular interest in hazard evaluation.

At Casita, the characteristic structures are normal faults over the upper flanks, thrusts at the base and strike-skip faults that relay deformation between thrusts and normal faults. The shape produced is concave-convex-concave, due to a steepening of the mid-flanks and a flattening of the summit region. A large horseshoe-shape scarp on the southeast flank of the volcano corresponds to a gravitational slide deeply-rooted in highly altered rock, and a weak pumice layer (Figure 1). While the connection between deformation and hydrothermal alteration appears clear at Casita, the relationship between the position and extent of alteration and the style of deformation is unclear. It is necessary to characterise deformation if it is to be detected and analysed on other volcanoes. For this reason we have carried out an analogue study, to find the structures produced by different geometrical configurations of altered and fresh rock.

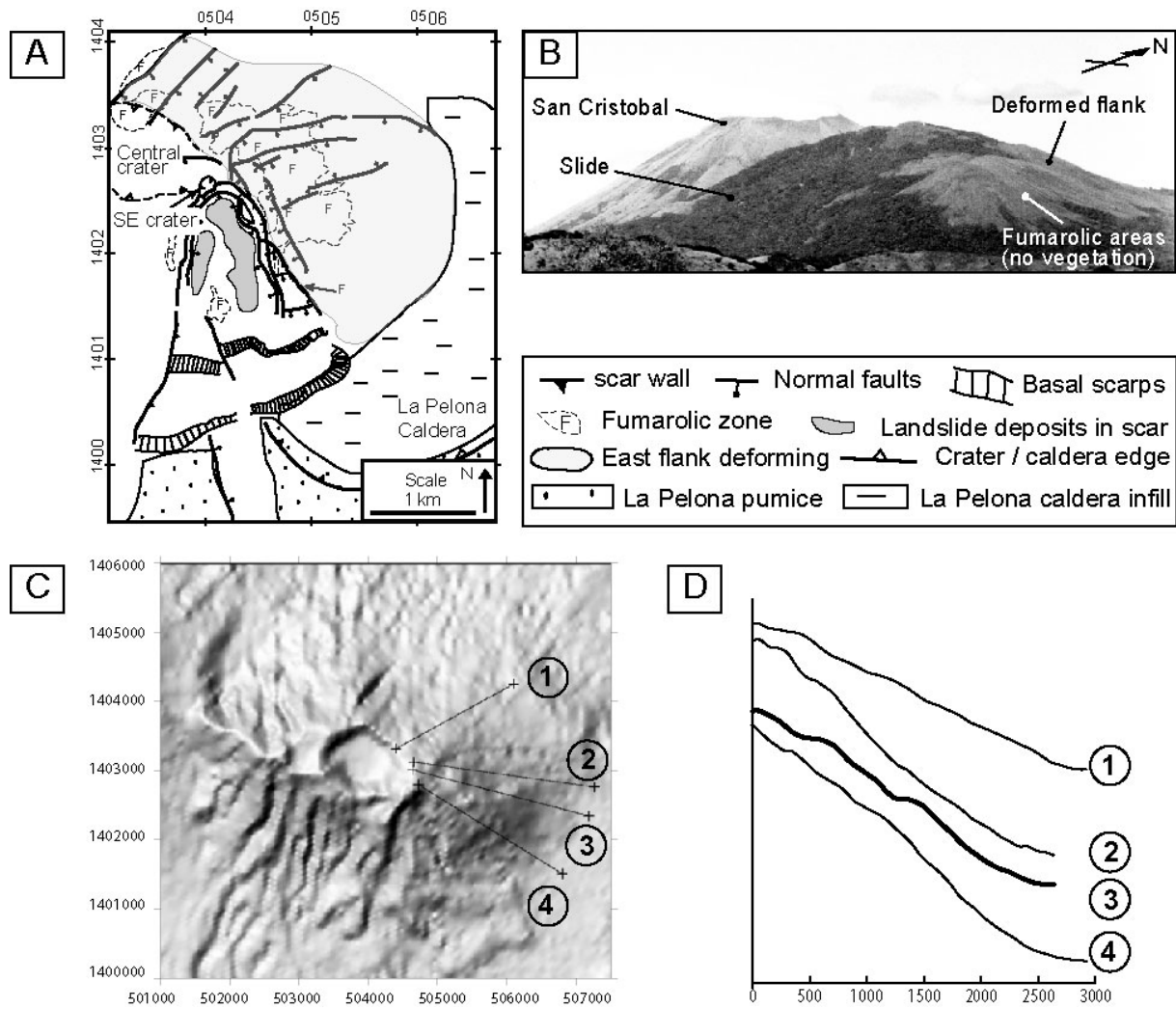


Figure 1

Casita volcano, Nicaragua. Adapted from van Wyk de Vries, et al., (2000). A : Structural map of the deformed flanks of Casita showing the south gravitational slide with its well-formed horse-shoe scarp, and the east flank deformation. B: Picture of Casita showing its deformed topography and altered areas. Another volcano in the background, San Cristobal, shows the morphology difference between a deformed and undeformed volcano. C: DEM of Casita where flank sections of (D) are located. D: East flank sections showing deformation: concave-convex-concave or convex-concave profiles.

Hydrothermal activity and edifice weakening

Active volcanoes generally have a well-developed hydrothermal system. Each hydrothermal system has its own size and volume, its own chemical and physical characteristics, and develops in a different way from one edifice to another. A hot and pressured fluid circulation is generated and maintained by intrusive bodies. A mixture of infiltrating meteoritic waters and magmatic fluids interact with host rocks, producing brines, rich in corrosive chemicals. The fluids thus acquire an important alteration potential (Lopez and Williams, 1993).

Rock alteration and high fluid pressure are two phenomena developed by hydrothermal activity that can weaken an edifice. Hydrothermal alteration is a general term grouping mineralogical, textural and chemical rock response to a thermal and chemical environment change with fluids (Wohletz and Heiken, 1992). Alteration processes consist of rock dissolution and precipitation of altered minerals in free porous space and fractures. Depending on pressure, temperature and water composition, dissolution or precipitation will be active in preferential zones inside the edifice. Dissolution is effectively more efficient when pressure and temperature increase (Day, 1996).

Hydrothermal alteration greatly modifies the physical properties and behaviour of rocks that lead to a weakening of the volcanic edifice. Although little is yet known about *in situ* properties of altered volcanic rocks, a few notions, however, can give an idea of these physical modifications. Changes of rock properties depend globally on the alteration process type (dissolution or precipitation) and the nature of altered minerals precipitated.

The fact that alteration processes can change in space and time means that physical properties of rocks also change spatially and temporally. When precipitation dominates, cohesion and density may increase. Free space is reduced and heavy minerals precipitate. The substitution of a mineral by one of lower density can happen also, like clay replacing olivine or pyroxene and can locally decrease density. Porosity and permeability decrease as secondary minerals precipitate and clay forms in the free space. The apparition of clay can significantly decrease the friction coefficient (Day, 1996). Rock viscosity can decrease when temperature and pressure conditions of hydrothermal system rise. When dissolution dominates, opposite effects as for precipitation are expected for most parameters: decrease of cohesion, density, porosity and permeability. It is more difficult to assess the modification of viscosity and the friction coefficient in this case. It is thus difficult to predict of the general behaviour of altered rock masses, although a strength decrease is a good approximation for clay-rich altered rocks.

High pore pressure is very efficient in weakening rocks, probably much more so than the physical modifications of rocks during alteration (Day, 1996). high fluid pressure in the hydrothermal system favours fracturing and as a result, a loss of strength. Furthermore, altered rocks are more likely to permit very high pore pressure compared to fresh rocks as fluid pressure can accumulate in zones encircled by low permeability carapace zones.

When fracturing, altered rocks show a brittle behaviour. However, modifications of rock composition, such as creating a large clay fraction or secondary minerals like quartz can favour a ductile behaviour (Petley and Allison, 1997, Fournier, 1999). Fluid presence will have a similar effect. When pressure and temperature conditions are relatively high, and when strain rates are quite low (10^{-12} s^{-1} for example), altered rocks can adopt a ductile behaviour at volcano scale, even if the mechanism is brittle at a smaller scale. This phenomenon has been revealed in laboratory experiments on clay samples (Petley, 1996).

Summarizing, intense large scale fracturing of rocks associated with hydrothermal fluids and the combination of physical, chemical and mineralogical modifications generated by hydrothermal alteration lead to edifice weakening. Compared with fresh volcanic rocks, altered rocks form regions

of low strength in the edifice especially susceptible to external forces, and ductile response can be expected under gravity, resulting in edifice deformation and destabilization.

The 3D extent of the hydrothermal system, can be approximated by surface manifestations (fumaroles, hot springs, apparent altered areas), geophysical studies and drilling, but this often constitutes an arduous task. Besides, as the hydrothermal system can vary rapidly with edifice evolution, it can become quite difficult to locate regions affected by the hydrothermal activity.

Analogue modelling

Model scaling

The analogue models are a development of those presented in van Wyk de Vries, et al., (2000). They use two types of material, a granular mix of sand and plaster to simulate fresh volcanic sequences, and a silicone putty to simulate altered areas (Figure 2). Such materials are commonly used in analogue models and the scaling and physical properties are well known (e.g. Merle and Borgia, 1996, van Wyk de Vries, et al., 2000). A Mohr-Coulomb rheology characterizes the cohesive granular material and the silicone has a Newtonian behaviour when pure and a Bingham behaviour when mixed with sand. Physical properties of the materials used considered are listed in Table 1.

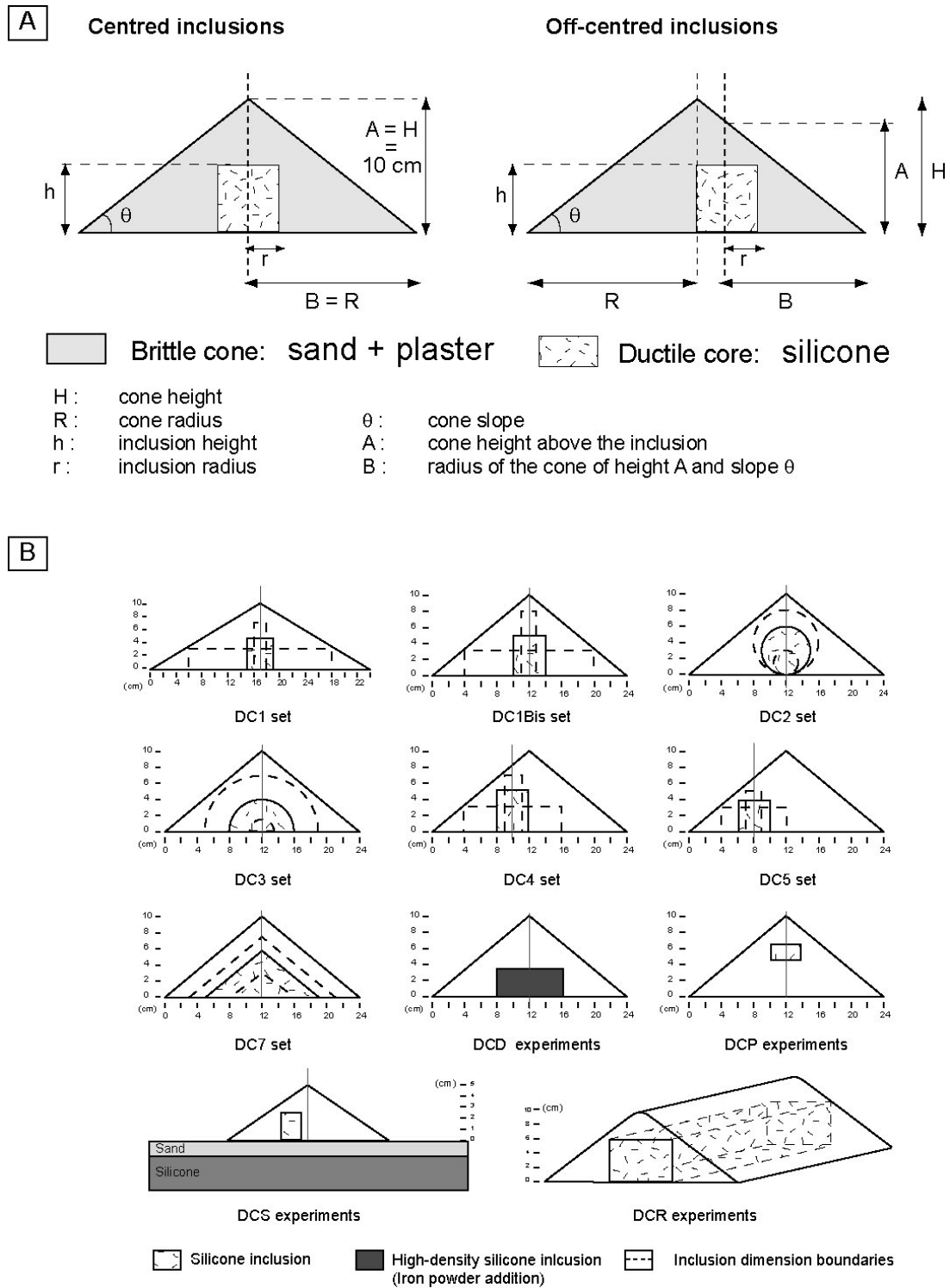


Figure 2
Analogue models. A: Sketches of an inclusion centred model and an off-centred inclusion model, with the different important geometrical parameters. B: The different sets of experiments done.

First approach

For a first approximation our models are scaled by standard analogue procedures (Merle and Vendeville, 1995, Hubbert, 1937, Ramberg, 1981) to make sure all forces, lengths and times are realistic (Table 1). Length scale is taken to be **Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.**, where 100 m is 1 cm in the model. Density scales at about 0.5 (Rock is about 2650 kg.m⁻³, sand-grain mixtures about 1400 kg.m⁻³), and gravity acceleration is the same for model and nature. A good approximation of stress is the product of length scale, density scale and gravity scale and thus is about 10⁻⁵. Cohesion also has units of stress and scales accordingly, thus the cohesion of the granular material should be 10⁻⁵ times less than the prototype. Cohesion in volcanic edifice rocks varies enormously, from near cohesionless scoria layers, to massive lavas with cohesions of up to 10⁻⁷ Pa. Pure sand is effectively cohesionless (Claudin, 1999), but mixing plaster and sand creates a cohesive material up to 100 Pa, and so scales appropriately in the models.

Viscosity is a major unknown in volcanic edifice rocks. Intact fresh volcanic rocks probably have viscosities of 10²¹ – 10²² Pa.s (Ramberg, 1981) and are effectively brittle on volcanic edifice timescales. Altered regions where clay contents are high should have viscosities similar to clay rich sediments (very clay-rich to clay present viscosities of 10¹⁷ – 10¹⁹ Pa.s). High pore pressures may lower this value by several orders of magnitude (Cobbold and Castro, 1999). Some types of alteration may raise viscosities, while magma, if present, will lower it. Magmatic intrusions such as cryptodomes may have bulk viscosities of 10⁻¹¹ or less (Alidibirov, Dingwell, et al., 1997).

Our silicone has a viscosity of 4×10⁻⁴ Pa.s when pure and 10⁵ Pa.s when mixed with 20% sand (Girard, 2002). Scaling viscosity thus gives a ratio of 4×10⁻¹³ if we decide to take the clay rich case, as edifices are often highly altered and other factors (such as elevated pore pressure) also lower the viscosity.

Time in the models is calculated from the viscosity scale and the stress scale:

$$\sigma^* = \mu^* \cdot \dot{\epsilon}^* \quad \text{with} \quad \dot{\epsilon}^* \text{ the deformation rate ratio: } \dot{\epsilon}^* = \frac{1}{t^*}$$

It gives for our models 4×10⁻⁸, so one second in the model relates to about 0.79 years in nature. The models can be scaled to relate to other viscosities (such as lava and less-altered rock), the time scales related to such scenarios are given in Figure 3.

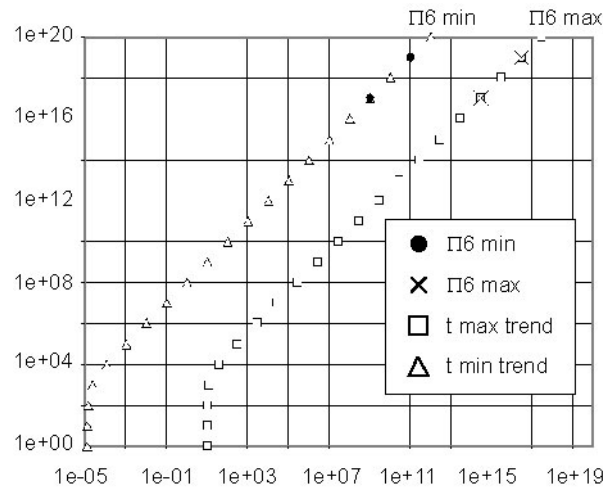


Figure 3

Scaling of time and viscosity. Diagram showing values of Π_6 calculated according to the scaling done (points). It also shows the range of time and viscosity for which the analogue experiments remain scaled (trends).

Buckingham Pi-Theorem approach

We have also considered a dimensionless number approach similar to that of Merle, et al., (1996). Such an approach scales the models and can help to evaluate the relative importance of the various parameters of the problem. The approach consists in establishing dimensionless numbers with all the important parameters of the studied phenomenon taken into account. These numbers have to be similar in nature and in the laboratory, given the natural values for which the models are scaled. Merle, et al., (1996), were concerned with a cone on a brittle ductile two-layer base. Here the ductile element is included within the cone (Figure 2), and geometric parameters are different, however the forces involved are similar.

There are 11 variables in our system and 3 dimensions, thus 8 dimensionless numbers can be found to characterise the system (Table 2). The three first numbers are geometrical characteristics of the system. The others deal with the forces, either implicitly such as in Π_4 (where unit mass is considered) or explicitly with the forces of gravity, viscosity, inertia, and failure resistance (described as unit surface forces). Formulas of these Π numbers are expressed in Table 3.

The dimensionless numbers allow us to define the characteristics of the system:

Π_1 is the average volcano slope and an indication of the volcano type, so stratocones have high values and shields low values. We expect in general that higher values indicate greater potential for deformation, due to steeper slopes.

Π_2 is the ratio between the height of the volcano and the height of the soft core. It provides a measure of the force exerted on the ductile core, so the higher this value, the greater the rate of deformation expected.

Π_3 provides an indication of the distance of the ductile core from the free surface, and thus the restraint provided by brittle rocks on viscous deformation. The smaller this value the lower the resistance.

Π_4 is the difference in unit mass (or density) of fresh and altered rock. The effect of this number is harder to evaluate; a high-density volcano may cause high deformation rates assuming that alteration products have a constant density. In the models, we found that changing the inclusion density had no detectable effect on the deformation pattern, while increasing the density of the sand mix did accelerate deformation.

Π_5 and Π_6 are balances of the driving and resistive forces of the system. The gravity acceleration being constant, Π_5 is controlled by the viscosity, and is thus proportional to the deformation. Π_6 is a modification of the Merle, et al., 1996 Π_6 , to include the effects of cohesion. In fresh volcanic rock the failure resistance is dominated by the cohesion, and in volcanoes this can vary from 0 to 10^{-6} (loose scoria to strong fractured rock). We take the higher value for our scaling of the highest cohesion used in our sand. Likewise viscosity can vary by several orders of magnitude for altered rock, and 10 orders if the inclusion is magmatic. Π_6 could potentially be highly variable and spans the range of volcanic landforms. For example an active lava dome has a low resistance (rubble carapace) and a low viscosity core, so Π_6 is high. At the other extreme a lava shield with little alteration would have low Π_6 . For further refinement the effective stress should be considered to take into account pore pressure effects. Note that an increase in fluid pressure would reduce the viscosity, and thus Π_6 would be higher, meaning a higher tendency of rocks to fracture.

The viscosity of rock presents a particular problem for scaling and modelling. Little is known about the apparent viscosity of altered rocks. A range of viscosity has to be first considered, depending on the nature of alteration. If the altered body is clay rich, its viscosity can be compared to clay rich sediments that have values of $10^{17} - 10^{19}$ Pa.s. If we consider that regions affected by the hydrothermal system present a high fluid pressure that tends to reduce the viscosity, we can assume that these are maximum values.

To check if our viscosity values are appropriate we can take the case of Casita volcano. Information on the deformation time allows us to calculate the viscosity of the altered body, knowing Π_6 number and assuming, according to the scaling, that it is constant in nature and in the laboratory. Deformation is rapid at Casita: a fumarolic activity has existed for 5 centuries (Hazlet, 1987) and the last eruption has been dated at 8330 ± 50 BP (Vallance, Kerle, et al., 2003). Therefore deformation began at least 500 years ago and is less than 8330 years. From Π_6 number, the viscosity is calculated for the two limit dates. As deformation is rapid, minimum value of Π_6 number is taken (1.05) and the case of a big ductile core is considered with a core height of 280 m. (H' calculation with $H = 1400$ m. and $\Pi_2 = 1.25$). Other values needed are in Table 1 (column 3). If $t = 500$ years, $\mu_N = 1.49 \times 10^{17}$ Pa.s and if $t = 8330$ years, $\mu_N = 2.48 \times 10^{18}$ Pa.s, which are coherent values with our scaling assumptions.

Π_7 is the balance of inertial and viscous forces. Inertial forces in nature and model are extremely small as velocities are low. However, Π_7 increases when the volcano deformation changes to a fast

moving landslide. This can happen in nature where fractured rock changed state to a flowing granular material, however this is not possible with silicone.

Π_8 is the angle of internal friction. It is not highly variable as internal friction angles remain between 30° and 40° in fresh rocks.

For the models to be scaled, these Π numbers have to be similar in nature and in the laboratory. Table 2 lists Π numbers and their values calculated with models values and nature values taken from the literature (columns A and B of table 1). This scaling allows finally calculating the nature values for which experiments are scaled.

Variables		Values			
		Nature (literature)	Models	Nature (calculated from scaling)	
		$0.1 \times 10^3 - 5 \times 10^3$	0.1		
H	Volcano height			$1 \times 10^2 - 5 \times 10^3$	m
R	Volcano radius	$2 \times 10^2 - 2 \times 10^4$	$1.2 \times 10^{-1} ; 1.7 \times 10^{-1}$	$1.2 \times 10^2 - 8.62 \times 10^3$	m
h	Ductile core height	?	$1.5 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^1 - 4 \times 10^3$	m
r	Ductile core radius	?	$1 \times 10^{-2} - 9 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^1 - 5.22 \times 10^3$	m
ρ_v	Volcanic cone density	$2.5 - 2.8 \times 10^3$	1.4×10^3	$2.5 - 2.8 \times 10^3$	Kg.m^{-3}
ρ_s	Ductile core density	$2 - 2.5 \times 10^3$	1×10^3	$1.8 \times 10^3 - 2.5 \times 10^3$	Kg.m^{-3}
t	Deformation time	?	$10^2 - 4.32 \times 10^5$ (5 days)	1.07×10^9 (34 years) - 3.08×10^{14} (9.8 My)	s
μ	Ductile core viscosity	$10^{17} - 10^{19}$	4×10^4	$10^{17} - 10^{18}$	Pa.s
Φ	Internal friction angle	30°	30°	30°	
τ_0	Cohesion	10^6	50	10^6	Pa
g	Gravity	9.81	9.81	9.81	m.s^{-2}

Table 1: Scaling: Geometrical and mechanical parameters of scaling and their values in (1) nature, (2) models, (3) nature calculated from scaling

Π Number	Description	Model values
Π_1	Volcano height / volcano radius	0.58 ; 0.83
Π_2	Volcano height / inclusion height	1.25 ; 6.66
Π_3	Volcano radius at inclusion height / inclusion radius	0.33 ; 9.77
Π_4	Volcano density / inclusion density	1.40
Π_5	Gravity force / viscous force	0.68 ; 1.26×10^5
Π_6	Mohr Coulomb failure resistance / viscous force	1.05 ; 5.75×10^3
Π_7	Inertial force / viscous force	1.28×10^{-10} ; 1.57×10^{-5}
Π_8	Internal friction angle	30°

Π numbers and forces	Formulas
Π_1	H/R
Π_2	H/h
Π_3	R'/r
Π_4	$\frac{\rho_v}{\rho_s}$
Π_5	$\frac{\rho_v \cdot g \cdot (H-h) \cdot t}{\mu} = \frac{\rho_v \cdot g \cdot H' \cdot t}{\mu}$
Π_6	$t \cdot \left[\frac{\tau_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot \tan \Phi \cdot \left(\frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi} \right)^{-\frac{1}{2}} \right) + \tan \Phi \cdot \rho_v \cdot g \cdot H' \cdot \left(1 - \left(\frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi} \right)^{-1} \right)}{\mu} \right] + \tan \Phi$
Π_7	$\frac{\rho_s \cdot g \cdot h^2}{\mu \cdot t}$
Π_8	Φ
Gravity force	$\rho_v \cdot g \cdot H'$
Inertial force	$\frac{\rho_s \cdot \left(\frac{h}{t} \right)^2 \cdot h}{h} = \frac{\rho_s \cdot h^2}{t^2}$
Viscous force	$\frac{\mu \cdot \left(\frac{h}{t} \right)}{h} = \frac{\mu}{t}$
Failure resistance force	$\tau = \tau_0 + \sigma \cdot \tan \Phi$ $= \tau_0 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \tan \Phi$ <p>from Navier-Coulomb criteria with $\sigma_1 = \rho_v \cdot g \cdot H'$</p> $\text{with } \sigma_3 = \frac{\sigma_1 - a}{b} - \frac{\mu}{t} = \frac{\rho_v \cdot g \cdot H' - a}{b} - \frac{\mu}{t} \text{ (cone load + viscous deformation)}$ $\text{with } a = 2 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{b} \text{ and } b = \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi}$

Table 2 and 3: Scaling: (2): Π number and their values. (3): Π number and force formulas. Forces are expressed as surface units. See table 1 and Figure 2 for the variable and Π number definition.

Experimental Procedure

The initial model is based on a simple sand cone set on a rigid support with a silicone core. Because the hydrothermal system develops around magmatic bodies inside and beneath the volcano, the inclusion was placed at the base of the cone. Nine sets of experiments were run with different inclusion sizes, shapes and positions (Figure 2). Inclusion shapes were cylinders, spheres, hemispheres cones, and amorphous irregular volumes. Inclusions were either symmetric or placed to one side of a cone. A set of experiments was also undertaken with a sand ridge, and elongated inclusions.

In a latter set of experiments we changed cone slope, and introduced a curved slope, more realistically to the convex stratovolcano profiles, and concave for shields. Lastly we combine the Merle, et al., (1996) spreading experiments with ours to test influence of volcanic spreading on a ductile substratum and flank spreading due to a weak core.

Models can be rapidly constructed and many repetitions and variations are possible. Initially models are observed in deformation, photographed and the deformation recorded by images, fault maps and cut sections. This is a qualitative analysis of the models. For sections the models are wet to increase cohesion and cause the plaster to set. They are cut rapidly into sections to avoid silicone flowage.

Deformation is also measured by several complementary methods to quantitatively complete the analysis. The simplest is by analysis of sequential images taken either in profile, or vertically. Deformation profiles have been done from the first pictures acquisition way (Figure 4 and Figure 6). No rigorous correction related to the image is done because the experimental view acquisition procedure in this case reduces image measurement errors (deformation tracking on a plane parallel to the image plane). Optical distortion of the sensor is also neglected as work is done on an image sequence.

Full 3-D reconstruction of the model is possible by stereo pair analysis (Donnadieu, Kelfoun, et al., 2003) or multiple image digital photogrammetry (Cecchi, van Wyk de Vries, et al., 2003). This last method was used to generate accurate Digital Elevation Models (Figure 4 and figure 8).

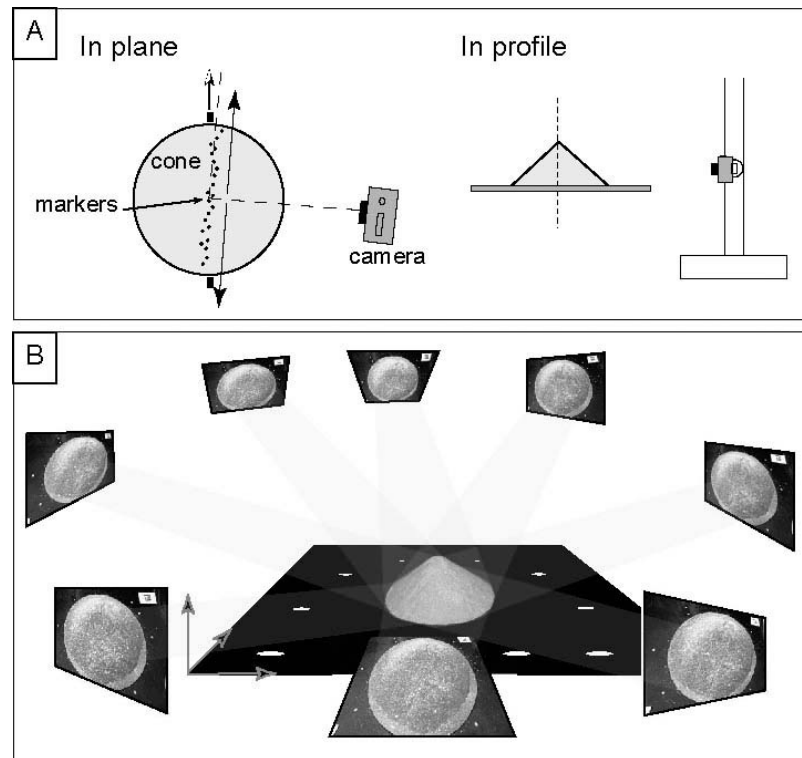


Figure 4:

A. View acquisition procedure for displacement profiles. Device showed in plan and in profile. Markers are placed over the cone and a picture sequence is taken parallel to the deformation axis. Image analysis gives point displacements in the (XZ) plane. B. View acquisition procedure for DEM generation. Multiple oblique views are taken rapidly around the model. It gives an image sequence that is used for 3D reconstruction. Different image sequences in time allow quantifying the Z deformation and following morphological changes.

Model results

From the range of models tested we have found three principle styles of deformation. There is a range of models where deformation is non-existent or so slow as to be geologically unimportant (taking the equivalent of several million years to form) and where subsidence is limited to the formation of a pit. These occur with volumes of silicone below a certain threshold. Above this limit deformation either involves the whole cone (symmetrical) or only one flank (asymmetrical) depending on the original position of the ductile core.

Geometry of deformation

Pit-type deformation

For the pit-type experiments deformation was limited to a small annular fault directly above the silicone inclusion (Figure 5). The collapse had the form of a piston-like subsidence similar to a pit-crater. Probably the summit load was high enough to cause failure of the sand at the roof of the inclusion. Deformation stopped when this load became equal to the resistance of the sand. The central block had subsided several mm for small diameter inclusions. For wider inclusions silicone rise could intersect the surface if left long enough. In this case the summit could continue to collapse. Such an experiment is then not valid for higher-viscosity hydrothermal altered cases, but could represent low-viscosity magma inclusions.

Symmetric deformation

Symmetrically placed large volume inclusions caused deformation all around the cone (Figure 5). The summit sagged down into the inclusion and small concentric thrusts developed in this region. Radial and concentric fractures and faults developed around the summit sag. The flanks outside the fractures became steeper and thrusts and landslides developed on the lower flanks. In most models a slight asymmetry developed, with one flank spreading out more, as models are never constructed with perfect symmetry.

The initial linear slope is modified to produce a concave-convex-concave slope profile. The summit sagging produces the upper concavity, and the bulging fractured region the convexity, while the lower steepened area is convex down to a lower undeformed region.

In the sagging area deformation style depends on the thickness/width ratio of the inclusion. When this ratio is high (i.e. the inclusion is a tall cylinder), the summit sags strongly and concentric thrusts are developed. However when the ratio is low (i.e. the inclusion is tabular) the summit sags less, but spreads laterally with the development of radial grabens. This effect is similar to that described for volcanoes spreading on weak substrata by van Wyk de Vries and Matela, 1998.

In all cases the deformed inclusion has a characteristic bowl shape after deformation. Initially the sides of the inclusion start to spear outwards and up, as the central part is depressed. The side of the inclusion displaces the sand and bends up the adjacent layers. The sand develops a thrust along which the silicone pushes up.

Asymmetric deformation

Asymmetric deformation is found when the silicone inclusion is not centred in the cone (figure 5). In these models the deformation is mostly in the direction of the asymmetry. A series of accurate normal faults develop around the summit, which relay around via en-echelon strike-slip faults to a flank thrust. An antithetic normal fault develops around the summit making a small summit graben when deformation is well advanced. Other normal faults develop on a bulging region above the thrust. The thrust is rapidly cut by landslides from the bulge. Eventually a tongue of silicone pierces the bulge. The profile along the deformed zone is again concave-convex-concave. The inclusion shape is similar to that of the symmetrical experiments, except that one side is preferentially developed into a tongue that has pushed up the fault.

Displacement profiles

Displacement profiles were generated by photographing experiments on a horizontal plane (Donnadieu, et al., 2003). For small inclusions with pit-type deformation, no significant flank deformation was observed (Figure 6). For symmetric experiments deformation is predominantly vertical in the upper region while for asymmetric there is a marked horizontal component towards the bulge. The bulge region has predominantly horizontal movement, with a small downwards component. Below the bulge, a small slope parallel movement can be seen in the asymmetric profile, which corresponds to grain sliding along the steep slope.

The deformation vector also changes with time for individual points (Figure 7). For a symmetrical experiment X displacement is roughly constant with time, and Z is slightly bigger at the beginning for the summit region. The bulge has a slight positive Z displacement initially, which then becomes negative. Asymmetrical experiments have initially rapid X and Z displacements, X becomes negligible in the summit region, at the same time as the graben develops, but outward movement continues elsewhere. Z displacements also decrease with time, and for the bulge region become positive for a period. For both sets of experiments the ratio of X to Z components remains linear, except of an important horizontal initial stage for the summit of the asymmetric model.

One 'pit' like model was also profiled (Figure 6). Over the 13 days that it was left to deform, no flank movement could be seen, however the profile analysis showed several mm of X and Z deformation. This occurred in the first day, during which the summit pit formed and was essentially slope-parallel.

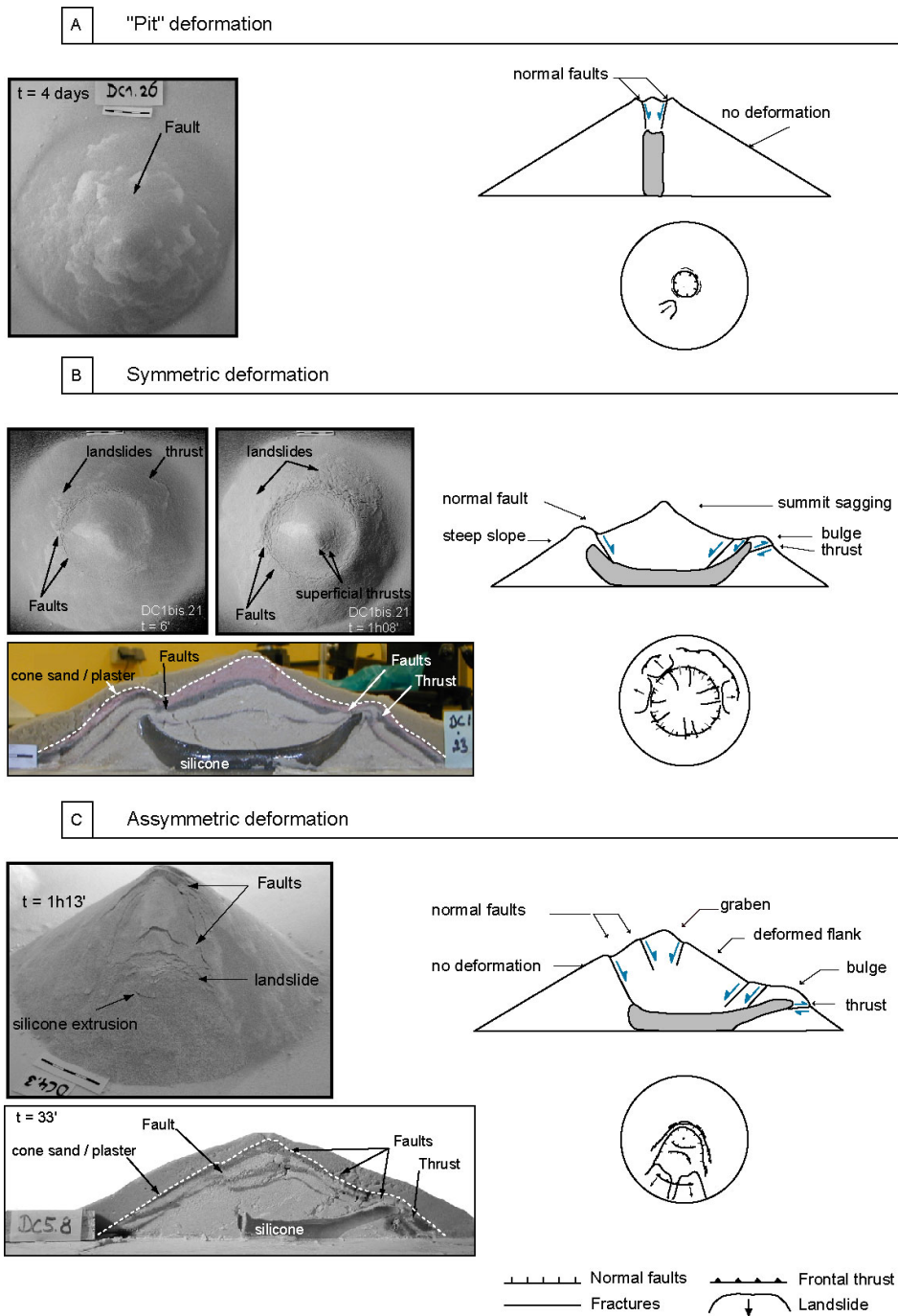
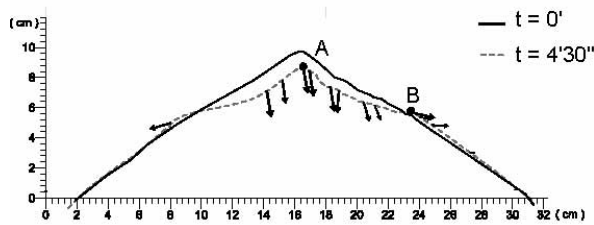


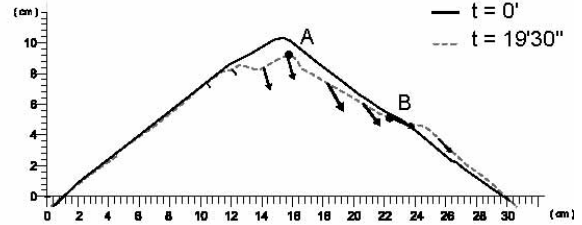
Figure 5:

Experimental results: the three deformation types. A. The pit type deformation: one picture and two diagrams (profile and plane) describe the deformation observed, that is normal faults developing above the inclusion and creating a pit. B. The symmetric deformation type. Two pictures show one symmetric experiment at different times. The third picture corresponds to a cut section. Deformation, drawn on two diagrams, consists of summit sagging and mid-flank bulging, with normal concentric faults and radial fractures developing at the transition. Thrusts develop early at the bulge foot and landslides occur where slopes get steeper. A gentle asymmetry is generally observed. C. The asymmetric deformation type. Preferential spreading occurs with normal faults developing at the cone summit, sometimes grabens, and thrusts at the front slump. A bulge appears and leads to frequent landslides.

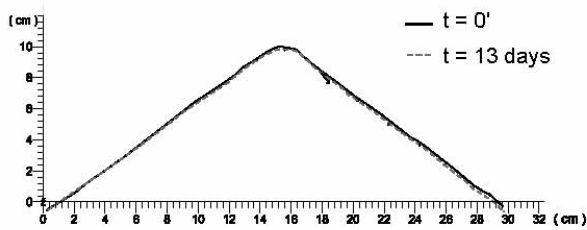
Symmetric deformation type (1)



Assymmetric deformation type (2)



"Pit" deformation type (3)



Displacement vector in the (XZ) plane \rightarrow

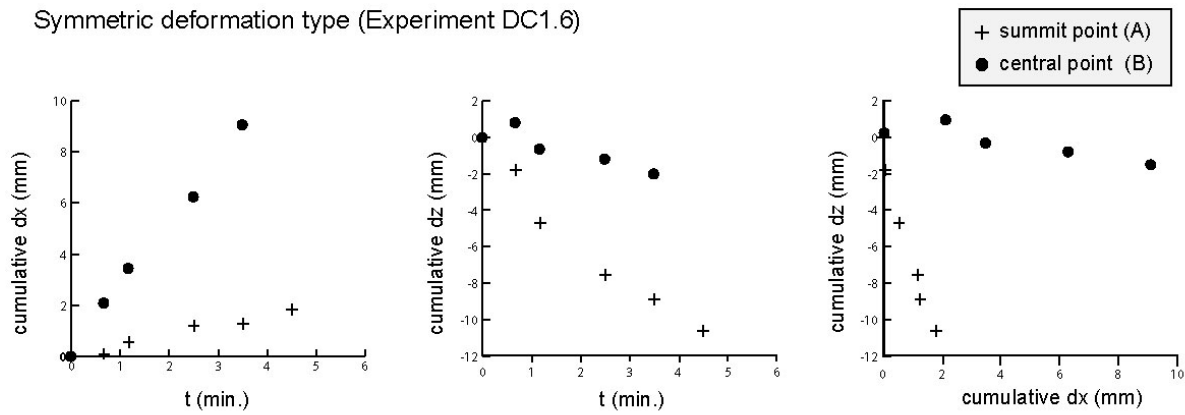
Experiment parameters :

- (1) : $h = 7$ cm - $r = 4.5$ cm - $x = 0$ cm
- (2) : $h = 4$ cm - $r = 3$ cm - $x = 2$ cm
- (3) : $h = 7$ cm - $r = 1$ cm - $x = 2$ cm

Figure 6:

Displacement profiles for each of the three deformation types. Experiment parameters are given: h = inclusion height, r = inclusion radius, x = inclusion / cone off-centring. Initial and final profiles are drawn, as well as (XZ) displacement vectors. These are proportional to the displacement amplitude. A and B are particular markers chosen for Figure 7. The concave-convex-concave profile is highlighted for both symmetric and asymmetric deformation. Vertical displacements are dominant in the summit, whereas the central part of the cone is characterized by horizontal displacement. Note that there is a small horizontal component in the summit part for asymmetric experiments. The displacements recorded for the pit deformation type are very small and located above the inclusion (A few mm maximum).

Symmetric deformation type (Experiment DC1.6)



Asymmetric deformation type (Experiment DC4.7)

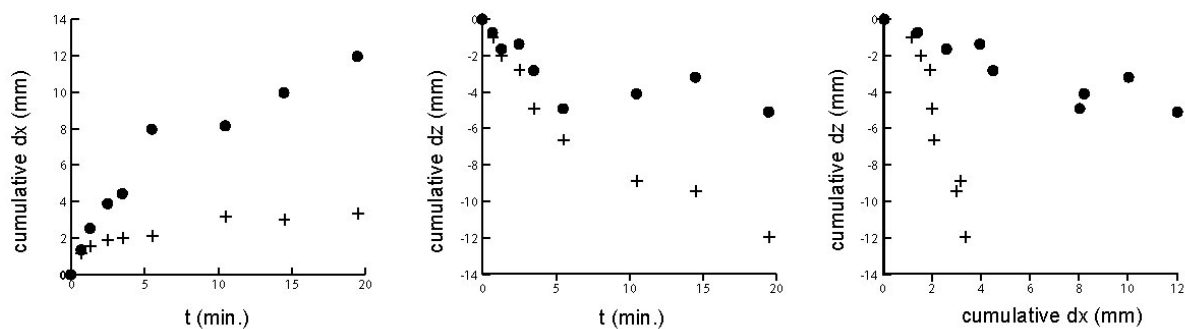


Figure 7:

X and Z displacements with time for symmetric and asymmetric experiments. Two markers are followed on each experiment, one located on the cone summit (marker A), and one in the upper part of the bulge (marker B). These specific points are localated in Figure 6. As both experiments do not have the same inclusion dimensions, direct comparison of velocities and displacement values is meaningless. The summit region is characterized in both experiments by large (more than 1 cm) and rapid negative Z displacements and by low horizontal velocity and displacements. In the central part of the cone, where the bulge forms, horizontal displacements and velocity are big compared to Z movement, and some positive Z movement appears during the point trajectory. For asymmetric deformation, horizontal and vertical velocities are bigger at the beginning of the experiment, whereas X displacement is roughly constant with time and Z slightly bigger at the beginning for symmetric deformation.

Deformation fields

Digital Elevation Models (DEMs) have been generated from image sequences taken at different times during selected experiments. The technique used is a novel 3D reconstruction approach using a multi-view analysis (Cecchi, et al., 2003). On figure 8, DEMs for an asymmetric and a symmetric experiment are shown. Deformation structures are accurately reconstructed, even if some small errors appeared on fractures, due to a lack of visual data for the reconstruction process, and also on

the rims of the cone, due to the model limits and the corresponding lack of texture in the image. The grain-flow patterns generated during cone building is visible. These DEMs allow quantitative description of deformation structures by analysing the Z deformation with time. On figure 9, Z deformation maps are presented for both selected experiments (symmetric and asymmetric), as well as a combination of deformation map, DEM and XY displacement vectors (Fig. 9C). Note that there is a slight asymmetry in the symmetric experiment clearly visible with the deformation data, probably due to the model building. The Z deformation maps are obtained by subtraction of DEMs.

Symmetric deformation type:

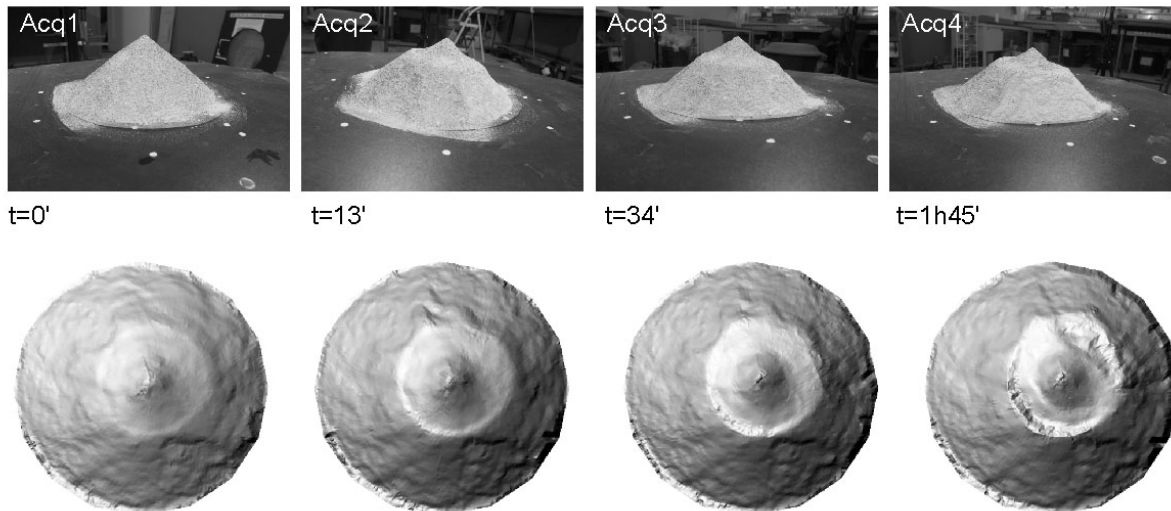
Summit sagging is visible early in the deformation and is constant during the experiment, which is in agreement with the previous displacement profiles. This sagging is relatively symmetric at the beginning but downward movement concentrates on the left half at the end of the experiment. A large landslide, visible on the (acq3–acq4) map and on the last DEM (Figure 8), is cutting the summit region. Slumps and slides on the central part of the cone appear early during the experiment and are characterized on the maps by uphill depressions (blue or slight red areas in central part) and downhill material accumulation (dark red areas). Positive and negative Z movements roughly balance each other, although a loss of material at the rim of the reconstructed models, due to an outward movement, could explain the exceeding negative Z movement seen in fig. 9C (-15 mm against +11 mm). XY displacement vectors are plotted over the DEM and the Z deformation map between the beginning and the end of the experiment. They represent about 50 points detected and followed manually in the image sequences. They show a preferential direction due to the slight model asymmetry. It also shows that the horizontal movement is greatest between the cone summit and the summit sagging and flank bulge transition, this being related to the small asymmetry. Attempts to follow points on the bulge area failed because of the loss of texture associated to the numerous slumping events.

Asymmetric deformation type:

At the early stages of deformation (first ten minutes represented by the two first deformation maps on Fig. 9B), a preferential summit depression develops and is limited by a single horse-shoe-shaped normal fault, as well as a bulge on one flank along the preferential deformation axis (NW-SE) showing first slumps and then two slides. During the experiment, grabens develop with normal antithetic faults, while the bulge growth continues. Once again, negative and positive Z movement roughly balance each other, with nevertheless a total exceeding negative Z movement (-20 mm against +14 mm) explained by outward movement (material outside the reconstructed area not taken into account). Reconstruction errors on the cone rims are easy to locate can lead to over-estimation of the Z deformation, as it is the case for acq2-acq3 map (+ 40 mm is over-estimated), acq3-acq4 map (- 26 mm is over-estimated) and acq4-acq5 map (+ 24 mm is over-estimated) of Figure 9B. Concerning XY

vectors shown in Figure 9C, the horizontal movement is clearly preferentially orientated outward along the deformation axis and increases from the summit to the depression and bulge transition.

Symmetric deformation type (1)



Asymmetric deformation type (2)

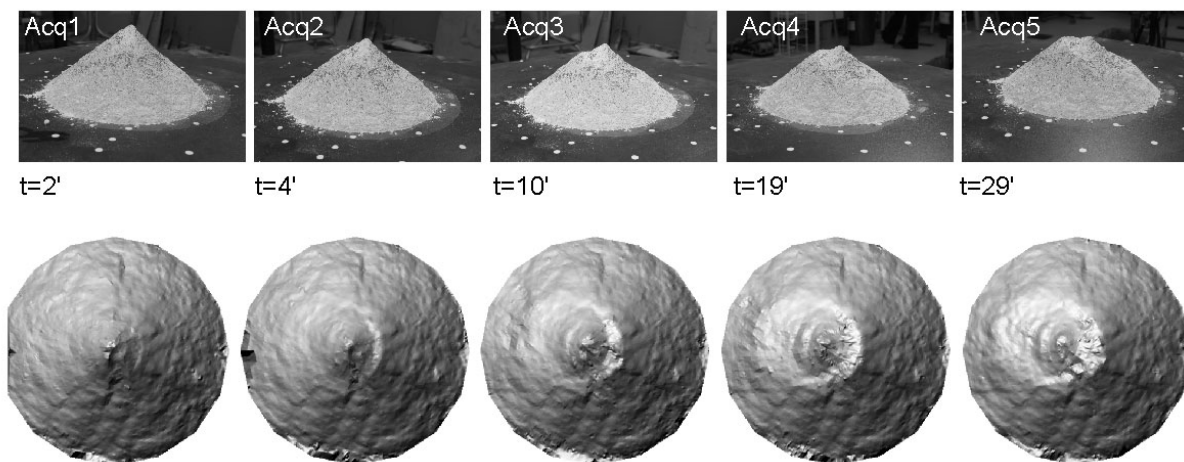


Figure 8:

3D surface reconstruction of one symmetric and one asymmetric experiment. DEMs are created from a multi-view 3D reconstruction technique. Four and five image acquisitions are done for the symmetric and the asymmetric experiments respectively. Deformation is rapid. Accurate reconstructed meshed models composed of more than 30000 triangular facets show the deformation structures and allow deformation quantification.

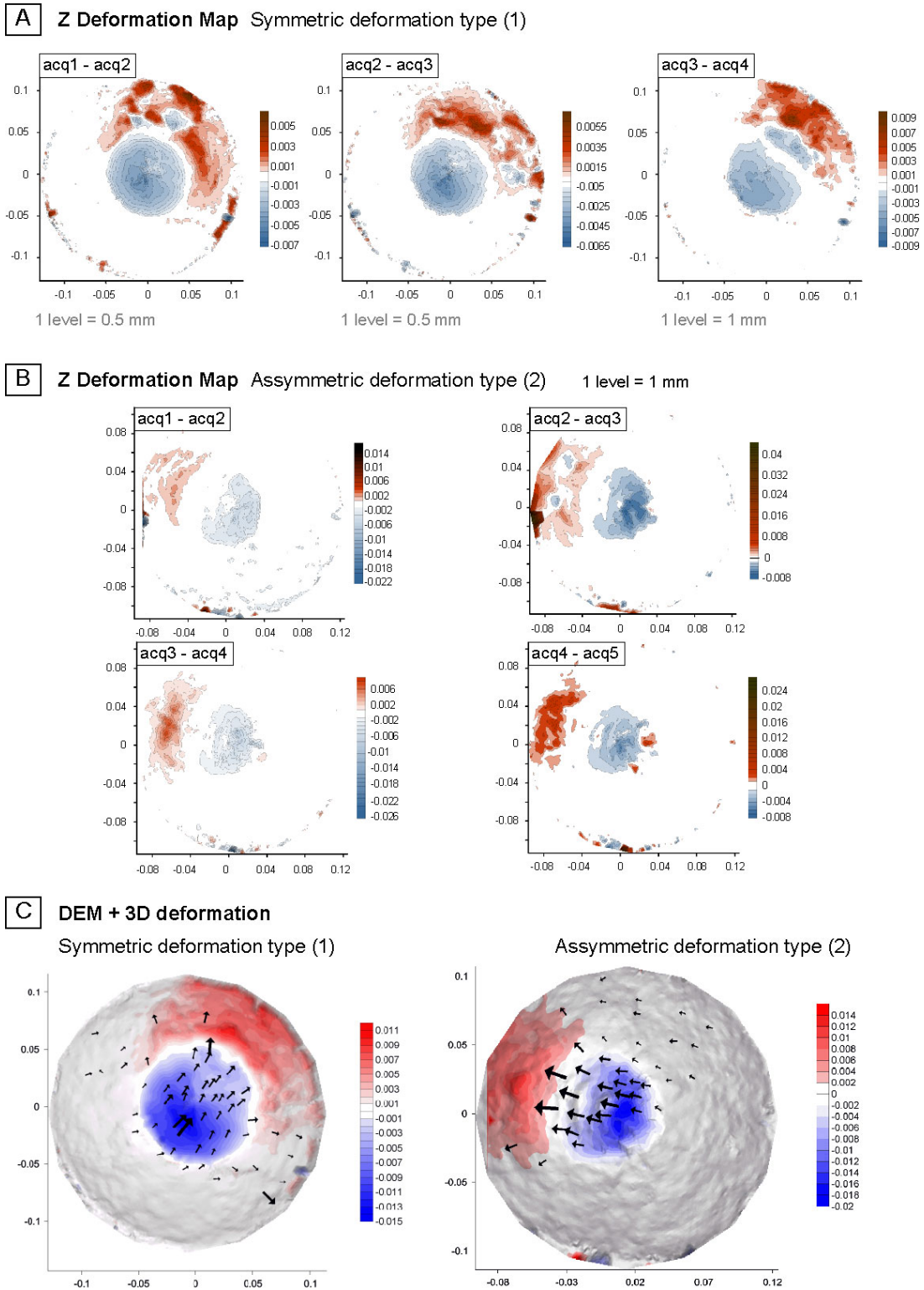


Figure 9:

Z deformation maps calculated from the successive DEMs (Figure 8) for the symmetric (A) and asymmetric (B) experiments, and scattered deformation fields (XY vectors and Z map) overlying final DEMs (C). Z deformation maps are obtained by subtraction between two successive DEMs. Very small deformations are detected: each colour level corresponds to 1 or 0.5 mm. In (C), XY vectors in black represent point XY displacements between the beginning and the end of the experiments. These points are detected manually on similar view-point images at different times, with coordinates calculated on the DEM.

Critical parameters in models

Analysis of the different variables can be used to determine what factors control the transition between the 3 types of deformation. Most clearly the data shows the transition between non-spreading 'pit'-type activity and flank spreading (symmetric or asymmetric).

The dimensions of the inclusion has an effect (figure 10-A1): both the inclusion dimensionless height (h/A) and width (r/B) must be large enough to allow spreading. This relationship is not alone sufficient to characterize inclusions of different shapes and the volume also gives information on the transition. In fact the volumetric fraction, which is a relative measurement because it takes into account the cone volume, is critical and can be used to describe the deformation transition. A plot of the volumetric fraction against the inclusion shape (Fig 10-A2) indicates that above 10% volume all models spread. This also shows that high thin (large h/r) inclusions do not spread.

The shape of the inclusion (sphere, cone, square, cylinder) has no appreciable effect on the appearance of deformation (Figure 10B), although complex shapes create different deformation patterns.

The inclusion position has an effect on the appearance of deformation, as it brings the inclusion closer to the free surface. It also causes the change from symmetric to asymmetric movement (Figure 10C).

Thus, in conclusion, it is the volume, the size and position of the inclusion, intimately linked that mainly control the deformation, and that the volume required to initiate spreading is small.

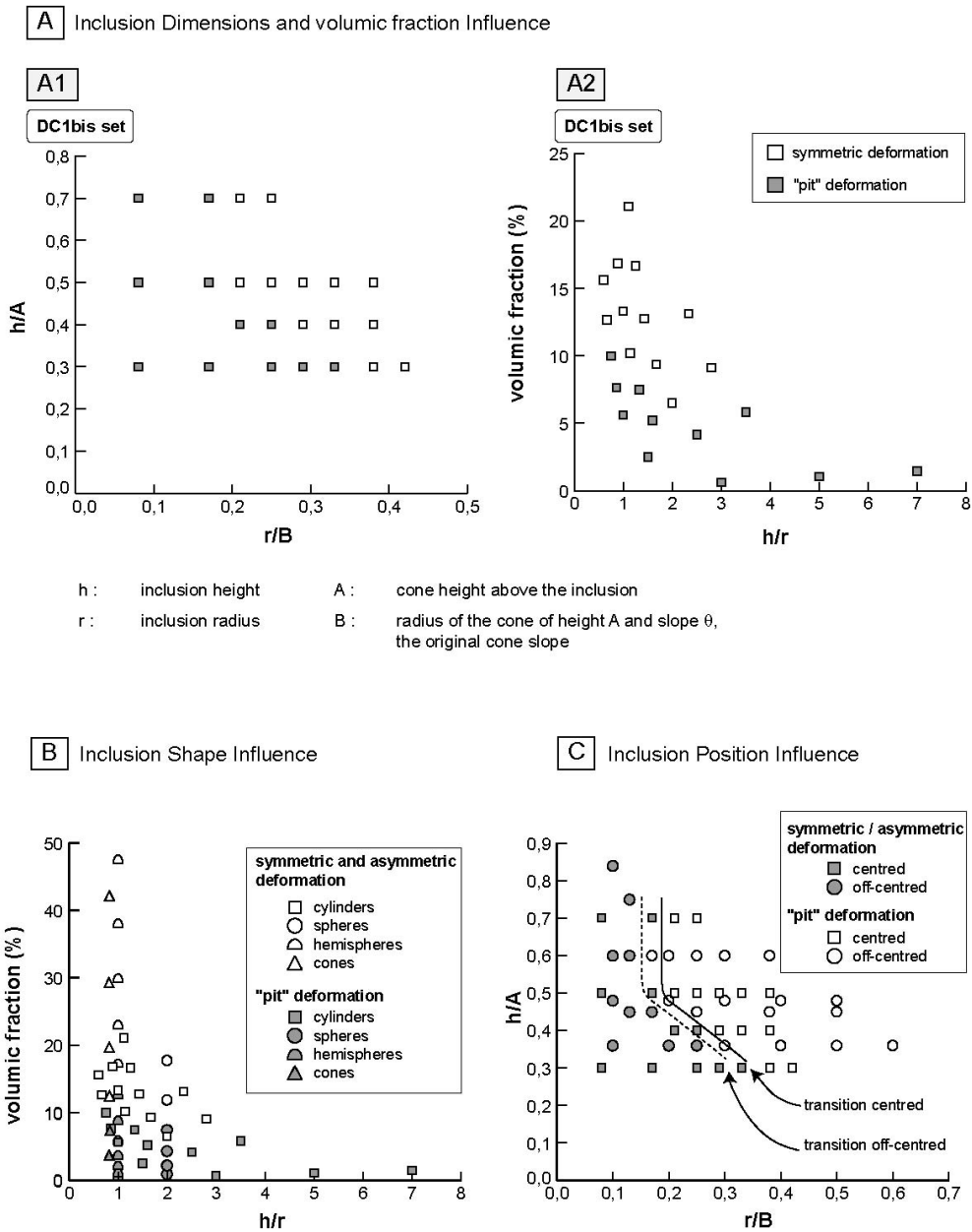


Figure 10:

Tested parameters and influence on the deformation type. A: Influence of the inclusion dimensions and volumetric fraction, showed using DC1bis experiment set corresponding to centred cylindrical inclusions. A1: For each experiment set, the deformation type is controlled by the inclusion dimensions relative to the cone dimensions, as showed with DC1bis data. A2: Plot of the volumetric fraction against the inclusion axial ratio h/r . As different inclusion shapes are tested, volume has to be taken into account to describe correctly the transition and compare the different set results. B: Influence of the inclusion shape on the deformation transition by plotting deformation type for the experiment sets with different inclusion shapes. No significant influence appears. The plot also shows that symmetric or asymmetric deformation can occur even for small volumetric fraction (10%). C: Influence of the inclusion position on the transition. Deformation starts at slightly lower values when the inclusion is off-centred (closer to the cone surface).

Experiments on other volcano shapes

We made several sets of experiments on analogue volcanoes of with lower slopes down to shields of 10° and different shapes, such as ridges, in all these the same general deformation patterns were revealed, and the same rule that at about 10% volume flank spreading occurred. It is thus important to note that under the right conditions even volcanoes of very low slope angles could evolve flank-spreading features.

Comparison with spreading and sagging models

The models presented up to this point show the effects of altered core deformation on edifices on a rigid base. However in a lot of cases, volcanoes lie on ductile substrata and are likely to spread (Merle, et al., 1996), or sag (van Wyk de Vries, et al., 1998). We thus conducted several experiments with cones having a ductile core and ductile substrata. In all our experiments the flank spreading was the dominant mode of deformation. This is in accordance with the rates of deformation measured in each type of deformation. The ductile core experiments are about ten times as rapid as the substrata spreading ones explored by Merle, et al., 1996.

Natural cases

This study was inspired by the structural analysis of Casita volcano, that showed that this volcano was deforming on an altered core (van Wyk de Vries, et al., 2000). Using the present model results and the geometry of Casita we can say that it is deforming in a slightly asymmetric way. Most flanks are deforming, but that the southeast side is preferentially spreading, and has initiated a large flank slump. In this slump the altered clays actually outcrop (Kerle et al., 2003). The slopes of Casita show the characteristic profile, except sometimes lacking the upper concavity due to having originally a flattish summit. This symmetry and the faults define the limits of the deforming area (Figure 1A).

We have chosen several other volcanoes for analysis, either because they show likely flank spreading features, or that they are end-type volcanoes, such as being so young to be unlikely to show spreading. Even if the analogue modelling simplifies the studied phenomenon, characteristic deformation patterns have been discovered on some volcanoes.

Arenal

We chose first a young, growing stratocone: Arenal, the most active volcano in Costa Rica. If the cone was altered enough, or full of deforming magma, structures or a characteristic slope profile might be detected. Using a 25 m DEM and aerial photographs we searched for structures on the

cone. The profile is concave, and does not look like spreading one, even on the older part (half East) of the cone. There are, however, two features of interest. One is a set of steps on the East flank (Figure 11A). We thought at first these could be DEM artefacts (steps are common on such DEMs), however analysis of aerial photographs allowed us to confirm their presence, and subsequently they have been field-verified (G. Alvarado, pers. comm.). Above these we also find several small fault scarps on aerial photographs (figure 12B). These features appear to be slight folds in the lava surface, where the layers are sliding downslide on some incompetent horizon (probably scoria). Such features are common on mountain slopes in layered sedimentary successions that dip downslope (Voight, 1979). The higher faults may be partially compensating this sliding and may also have a regional tectonic origin (Alvarado 2003).

Despite the intense eruptive activity of the volcano, suggesting a well-developed and active hydrothermal system, no significant deformation pattern appears at Arenal. This volcano is relatively young (at least 7000 years, from Alvarado and Leandro, 1999) and may be it did not have enough time to develop an altered rock mass big enough to be able to deform. The particular cone construction, especially the low amounts of pyroclastic products particularly sensitive to alteration can also be a barrier to the edifice weakening by the hydrothermal system activity. Finally, intense eruptive activity can in addition mask existing deformation.

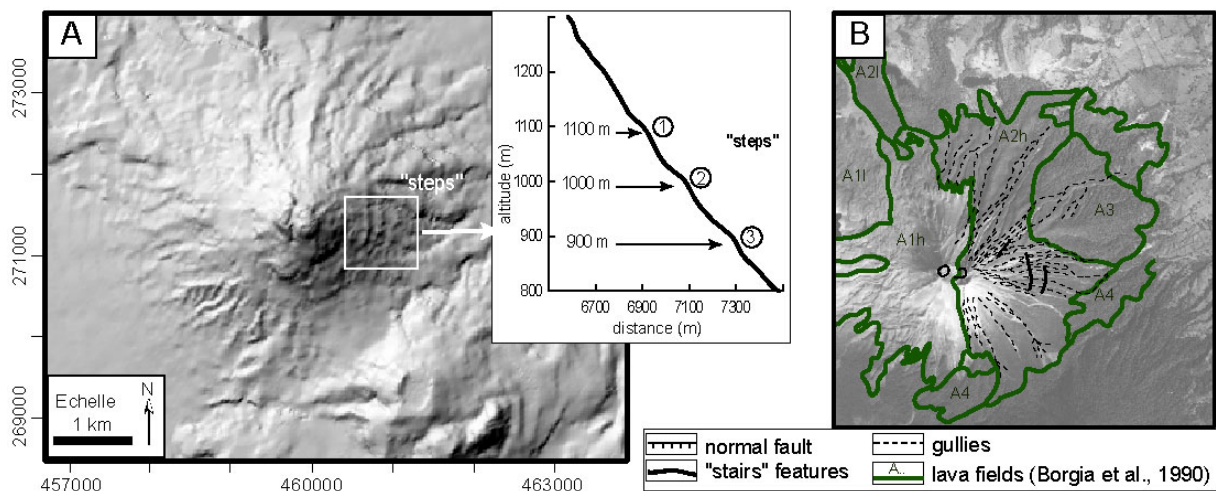


Figure 11:
Arenal example, Costa Rica. A: DEM and profile detail of the East flank, showing stairs-like features. B: Aerial photograph overlaid by lava field map. Stair-like features and scarps above are located. Lava field location is from Borgia and Linneman, 1990.

Momotombo

Another young stratovolcano has been chosen: Momotombo, Nicaragua. Since 1907, date of its last eruption, this symmetric cone of 1258 m. has had strong fumarolic activity with temperatures reaching 1000° at times. Aerial images show that fractures form an accurate pattern around the summit crater

(Figure 12). The fractures diverge at the lowest part of the crater, where the 1905 lava flow exited. The sense of movement is normal at the back of the crater but is strike-slip at the sides. This pattern is similar to that observed in the asymmetric models. Thus, we propose that the deformation is related to progressive alteration of the summit region by the intense fumarolic activity. If the magma resident in the cone rises as a plug, it will probably displace the lower side, possibly generating a summit debris avalanche. This presents a significant hazard of Momotombo, although the risk is low, as the avalanche would pass into little-inhabited areas and not towards the geothermal stations.

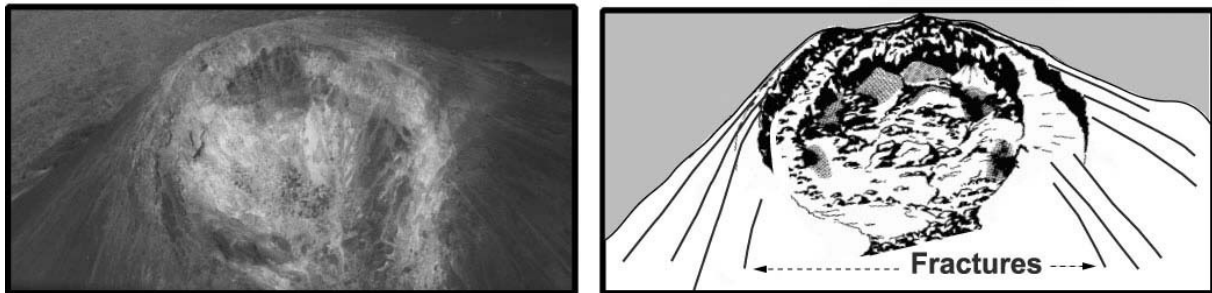


Figure 12:
Momotombo example, Nicaragua. Photo of the crater and drawing highlighting fractures around the summit.

Telica

Telica is a shield – like volcano in NW Nicaragua. It is cut by pronounced north-orientated faults, that are related to regional strike-slip motion and stress localisation by the volcanic edifice (van Wyk de Vries and Merle, 1998). The volcano also hosts a major geothermal field (EL Najo - San Jacinto). While investigating these features, with DEM and radar images we found that the N flank has a depressed area, and that normal faults followed a crescentic pattern around a depressed area, that is highly altered. Telica's lava-dominated shield slopes are 15° in this area, illustrating the possibility of deformation even at low angles (Figure 13). The active crater at Telica also hosts a vigorous hydrothermal system, and to the north has a set of crescent faults, there have been previously been interpreted as buried craters. However they may also be a small gravity slide associated with a steep step at the south base of the cone (Figure 13).

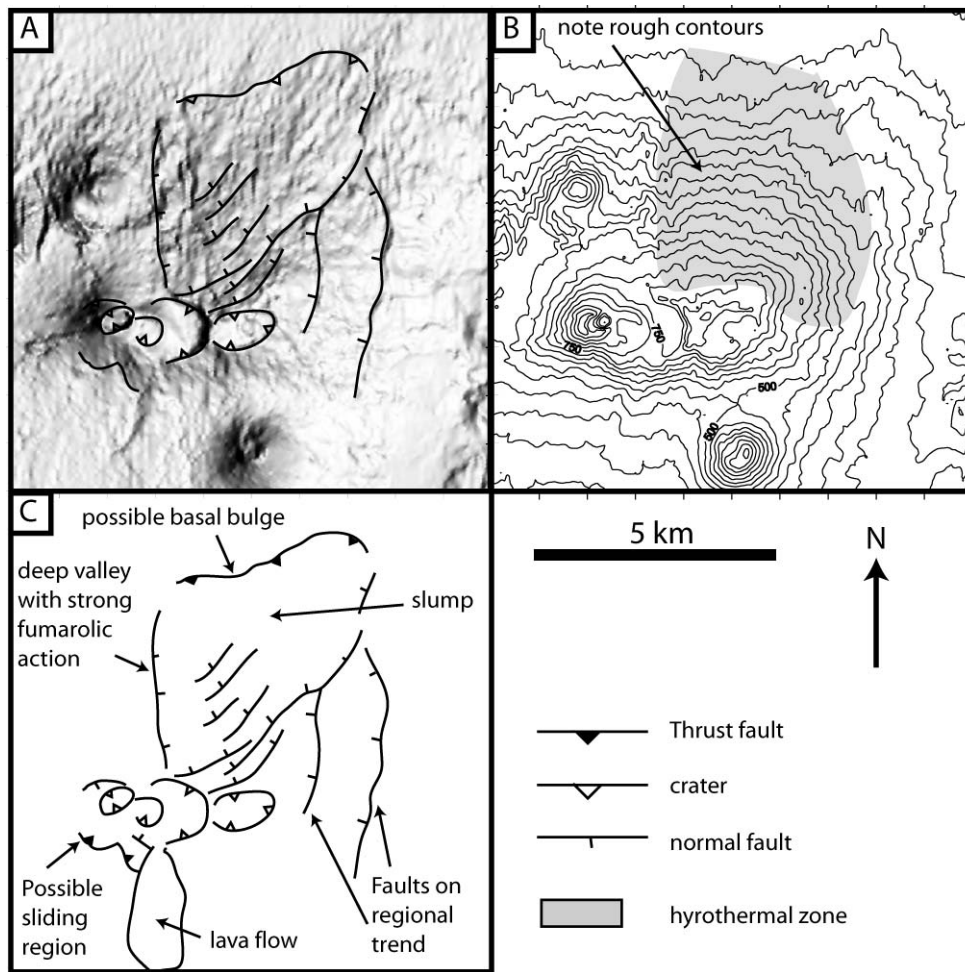


Figure 13:
 Telica volcano : A: shaded relief map of Telica showing the irregular, but shallow northern slopes that are underlain by a highly active geothermal resource (El Najo). B: Topographic map (contours every 20 m), showing the rough area on the geothermal field. C. Interpretation of the topography in terms of normal faulting and sliding at the base. Note also the steep southern side, where the active crater area appears to be sliding as well.

Mombacho

We also turn our attention to volcanoes already presenting collapse structures or important flank slides. Mombacho, a stratovolcano on the shore of lake Nicaragua, has had three catastrophic flank collapses in the past. One of them, the “El Crater” scar and deposits, is probably directly related to hydrothermal alteration of rocks and consequent edifice weakening (van Wyk de Vries and Francis, 1997). Fumarolic activity is today still present and a new cone has grown on the northeast part of the edifice. This volcano seems to be developing again sliding structures on its north flank. Normal faults to the north of the summit have been identified from DEM and aerial photographs (Figure 14A), and the northern flank shows a characteristic concave-convex-concave profile (Figure 14B and 14C). The top 500 m of Mombacho’s north flank seems to spread and constitutes a threat in case of collapse for

the city of Granada, located at less than 10 km north the volcano (van Wyk de Vries, et al., 1997, Alvarado, 2000).

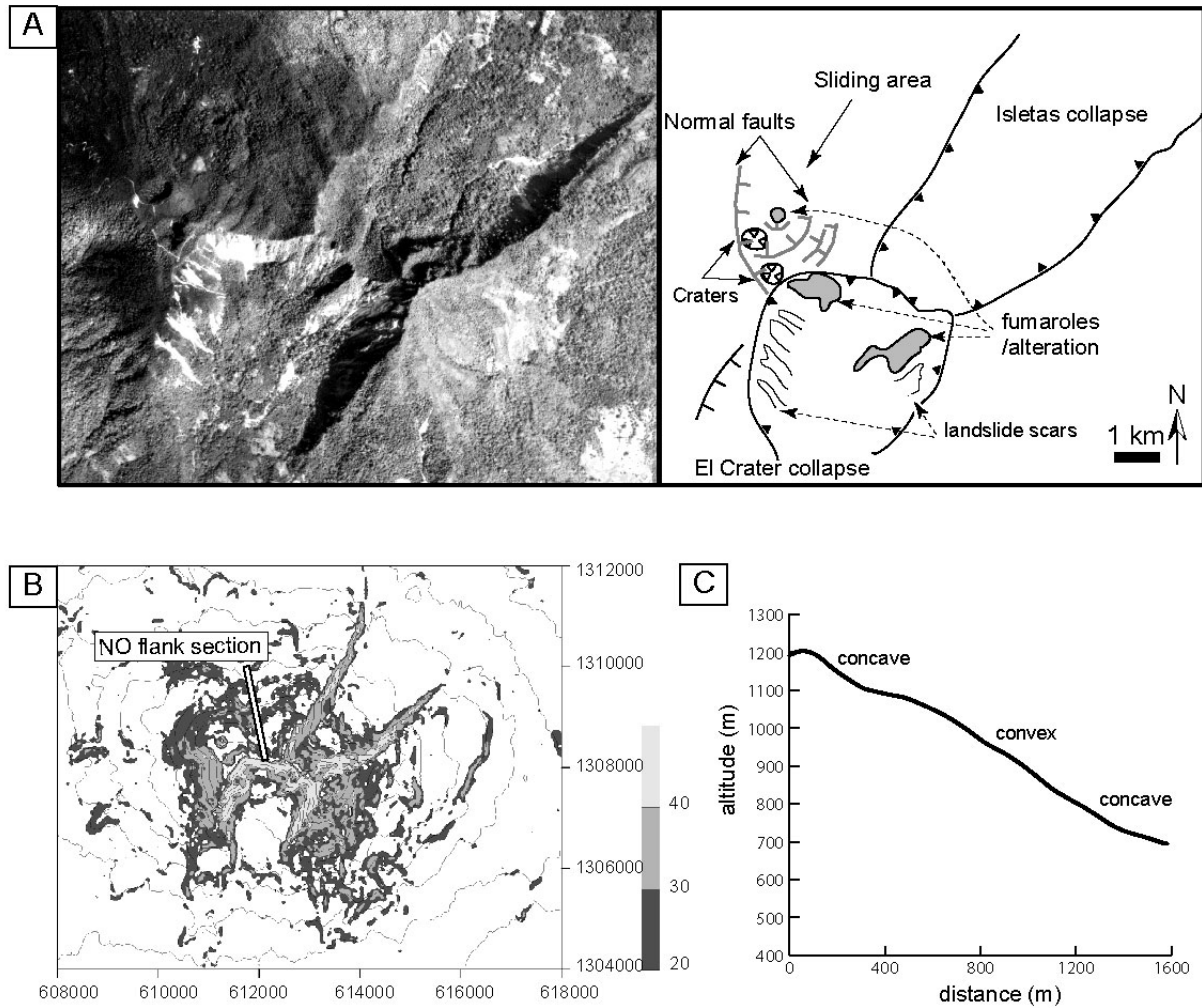


Figure 14:

Mombacho example, Nicaragua. A: Aerial photo and structural diagram showing the Las Isletas and El Crater collapse scars, as well as the northwest sliding flank. B: Slope map calculated from DEM. It shows slope steepening following topographic contours on each side of El Crater scar, particularly on the SE part, that can be related to deformation of the flanks. C: Cross profile of the NW flank, located on B, and showing the characteristic concave-convex-concave deformation profile revealed in the experiments.

Orosi-Cacao

An other example is the Orosi-Cacao andesitic complex in Costa Rica. The volcano Cacao presents two clear sliding features on its SW and SE flanks (Figure 15). We digitised maps to create a DEM and used Radar images to analyse the morphology of these features. Both SW and SE flank summit present two steep fault scarps interpreted as slump scars and the two sectors show basal thrusts at

their foot. The SE slump, presenting curved normal faults at the summit and flanks strike-slip faults, has the clearest similarity with analogue experiments, while the SW one is more eroded. This feature could explained the SW debris avalanche deposits that have been related to partial collapse of this sector and linked to an eruptive activity (Alvarado, 2000). Our study confirms the slumping assumption already made by van Wyk de Vries, et al., 1997. Similarity with experimental deformation pattern, altered rocks by hydrothermalism, breccias and fumaroles near the volcano indicate a possible link between the observed deformation and a weak core in the edifice.

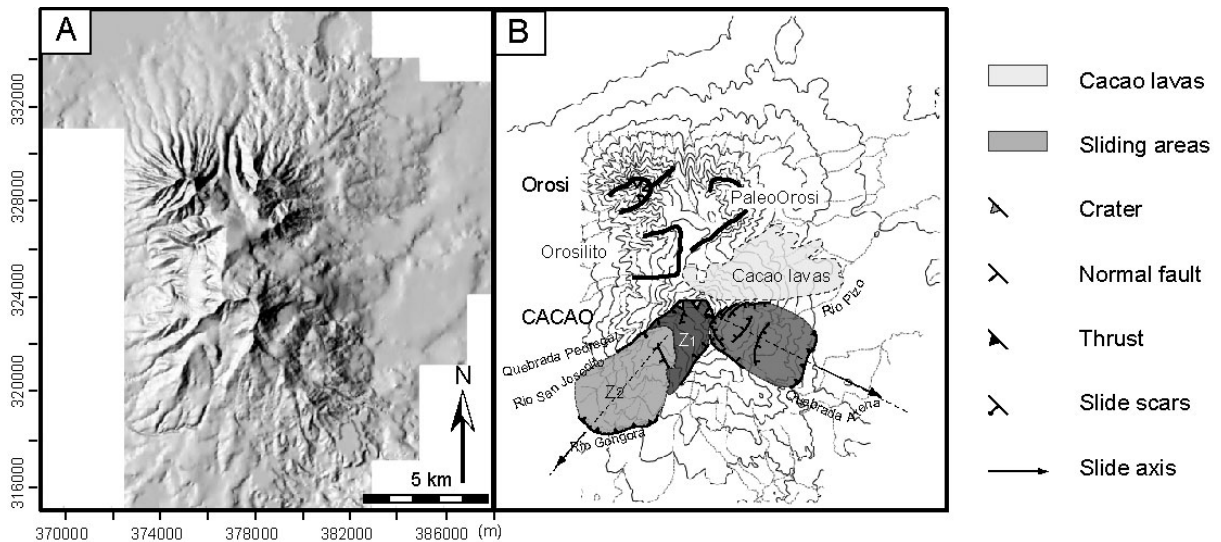


Figure 15:
 Orosi-cacao complex example, Costa Rica. A: DEM created from 1/50000 topographic map digitalisation. B: Schematic structural map of Orosi-cacao showing the two sliding sectors (SW and SE flanks). Z1 and Z2 are two zones composing the SW sliding sector.

Etna

The summit area of Mt. Etna has a convex-concave-convex profile. The high crater area, dominated by newly-built cones and craters is steep sided, but flattens (concavity) on most sides. There is a possible caldera rim (Piano Caldera) exposed in several places and then slopes become steeper. To the east, slopes drop steeply into the Valle del Bove where ground cracking and occasional small landslides have occurred (Murray, Voight, et al., 1994). Analysis of a DEM for slopes shows that Etna also could be deforming on a weak core, as well as the well documented substrata spreading (Figure 16).

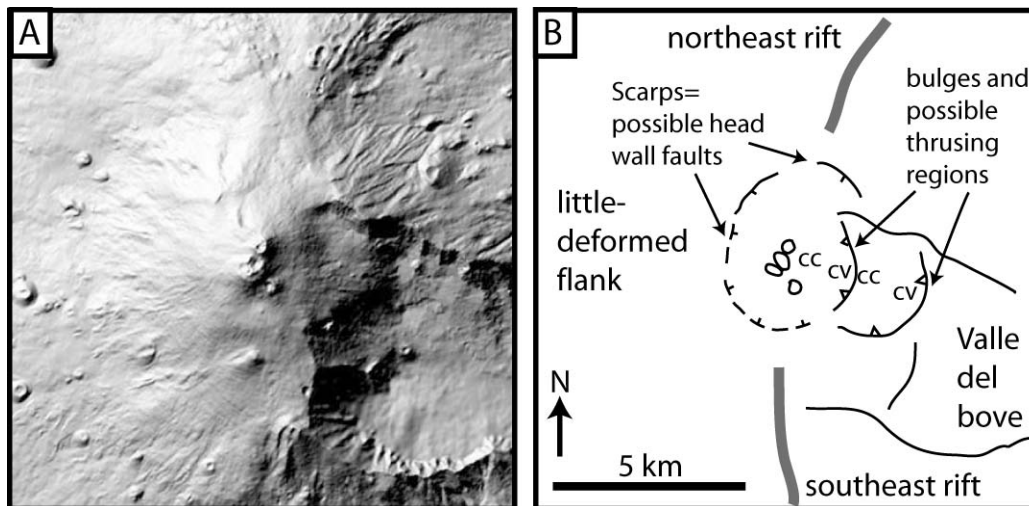


Figure 16:

Etna : A shows a shaded relief image of Etna DEM and B the interpretative structure and morphology. Note the double convex (cc) concave (cv) structure in the Valle del Bove slope, and the flattened summit area around the main cones.

Other sites

The Enclos Fouqué Caldera on Piton de la Fournaise, Fogo volcano, Cap Verde and Tenerife on the Canary islands all have structures that could be caused by flanks spreading (Merle and Lénat, 2003). Ruhapehu, New Zealand also has a strong hydrothermal system and has a characteristic shape. A recent review of volcano morphology in Central America showed that Baru (Panama) and several of the Guatemalan volcanoes have structures that may be caused by flank spreading (Van Wyk de Vries and Alvarado, *Geology of Central America*, + REF supplied by October 2003). We suggest that a full search should be made using the new world DEM coverage from the shuttle Terrain Mapping Mission to determine the number of volcanoes with flank spreading by this mode throughout the world.

Discussion

Analogue modelling has showed that a ductile core deformation in a stratocone or a shield volcano creates typical deformation patterns recognizable on natural volcanoes. The presence of these specific structures and displacements on natural volcanoes could indicate ductile behaviour of an altered core. Structures also give information on the core's dimensions and location. Conversely, if the spatial extent of the ductile region is approximately known, experimental results allow us to predict the types of deformation expected (Figures 5 and 10).

The scaling shows that for the chosen altered core viscosity, two main deformation types exist in nature: symmetric and asymmetric deformation. The transition seen in experiments between the "pit"

deformation type and symmetric or asymmetric deformation corresponds in fact to the apparition of the deformation in nature, as deformation time for 'pits' is not realistic at a volcano life scale. This "pit" deformation type could eventually occur when considering magma or altered areas with lower viscosities. In fact, forces controlling the deformation are expressed in the Π_5 and Π_6 numbers, which are proportional to $\frac{t}{\mu}$. These numbers being constant, if lower viscosities are chosen, time for pit-type deformation becomes reasonable at a volcano evolution scale.

Gravitational deformation of the ductile cored edifice is the source of slope instability and collapses. According to the experiments, three collapse generations can be defined occurring at different stage of the deformation (Figure 17):

Generation 1 collapses: correspond to superficial collapses that can occur during the gravitational deformation of the volcano. These occur in areas where slopes get steeper and where head scar faults develop. These would be landslides that can transform into small debris avalanches or into lahars. Experiments showed that they can appear early during deformation.

Generation 2 collapses: flank catastrophic collapses that can happen after a progressive period of flank creep of variable duration. Experiments show that this type of collapse is likely to occur when deformation is asymmetric. Preferential flank spreading can potentially lead to collapse. This situation does not appear in the experiments as a brittle and ductile behaviour combination in a single analogue material was not possible. However major faults developed at the creep head could act deeper as a sliding surface. These faults developed in the brittle part of the volcano could extend into the ductile altered body in nature. Field evidence shows that sliding surface can be located in altered zones (van Wyk de Vries, et al., 2000). Brittle/ductile transition of altered rocks can be explained by a deformation rate increase, itself related to greater edifice instability. Various mechanisms can trigger the increase, such as magma intrusion or pore pressure increase for example. Micro-fracture increase and fracture coalescence in the altered body could also be an explanation for the catastrophic collapse mechanism, as proposed in studies concerning deep-seated landslides (Petley, et al., 1997). Another possibility to explain catastrophic collapse is that the altered body works like a slip layer along which the above rock mass can slide. Progressive alteration will also increase slippage.

Generation 3 collapses: come from collapse scars, when unstable or altered rock bodies remain. Of small volume compared with 2. They even could be devastating. Like generation 1 collapses, they can lead to small to moderate debris avalanches and lahars.

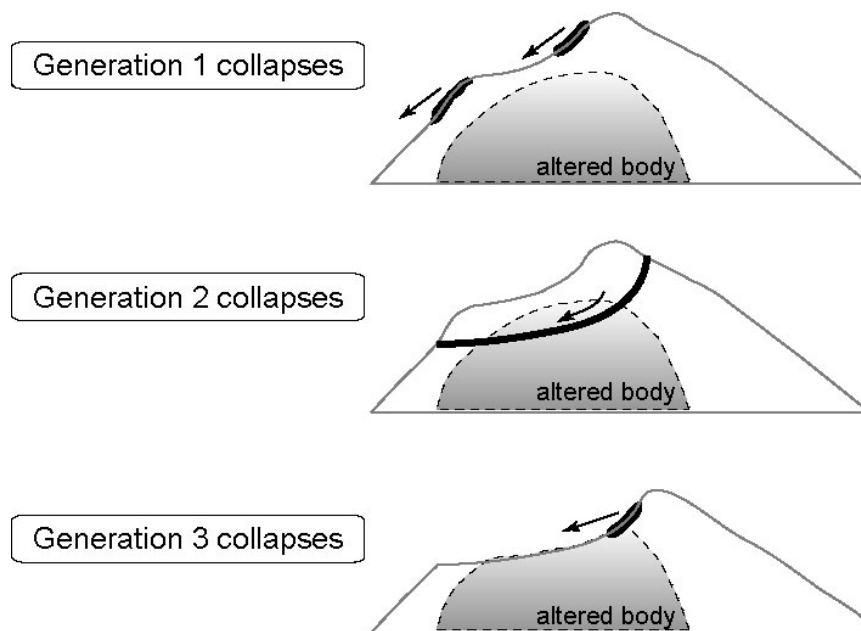


Figure 17:

The 3 possible generations of collapse during the gravitational deformation of altered core edifices. Collapse areas are located by arrows.

All these collapse types can be found in nature and field observations show that hydrothermal alteration seems to play a significant role in flank destabilization and ability to suddenly collapse. Numerous examples of altered products in debris avalanches or apparent connexion between altered areas and collapses can be found in nature. Among them we can cite the debris avalanche of Chestina in Alaska, resulting from a collapse of the Wrangell volcano, where an important fraction of hydrothermally altered clasts has been found (Wallace, et al., 1999). Strongly altered products were also found in the 26 december 1997 debris avalanche produced by the south flank collapse of Soufriere Hills, Montserrat (Komorowski, et al., 1999). At Mt St Helens, a connexion between the 1980 collapse and an old altered dome has been established (Swanson, et al., 1995). Siebert, 1984 and Siebert, et al., 1987 also outline hydrothermal system development and associated alteration in areas where collapses occurred or where potential failure exists. We suggest that hydrothermal activity (alteration and pore pressure effect) play a significant role in collapse generation for two reasons: (1) it creates weak zones in the edifice where failure can occur when phenomena like magma intrusion or seismic events occur. This concerns, for example, the Mt St Helens and Soufriere Hills cases above cited. (2) It induces gravitational deformation of the edifice and subsequent flank destabilization as shown in the experiments. Natural examples have been presented in this study.

Flank bulging is one of the features developed during gravitational deformation of altered core volcanoes. A similar bulge can also be produced by magma intrusion (Donnadiou and Merle, 1998, Donnadiou, et al., 2003). Distinction between these two phenomena that produce similar features can be done using quantitative information obtained in laboratory for each deformation. This was made possible using digital photogrammetry and profile displacements using images. Compared to ductile

core models, intrusion models present: (1) an horizontal component bigger in the bulge area, (2) a possible continuous and positive Z deformation for some points on the bulge, (3) a global positive balance volume and (4) a more rapid deformation.

Conclusions

Hydrothermal system activity produces, through rock alteration and high pore pressure, a weak zone inside the volcano especially receptive to external forces. Under gravitational forces, the altered core volcano deforms. Analogue modelling of this phenomenon allows the deformation to be characterized. It showed:

A characteristic concave-convex-concave profile of deformed flanks.

Two deformation patterns depending on if the altered core is centred or not relatively to the edifice. The symmetric case is characterized by an extension area of variable size in the upper part of the cone with radial and concentric normal faults, and small thrusts at the foot of the convex area (bulge belt). For an asymmetric configuration, a preferential spreading occurs. Sub-vertical crescent faults then develop at the slump summit and thrusts appear at its front. Normal faults orthogonal to the deformation axe appear on the slump sector and sometimes grabens develop on the summit.

That deformation is controlled by the volume, the position and dimensions of the ductile core relative to the edifice size. The volcano can deform even for a small fraction of altered rock: 10% of the total edifice volume.

That vertical displacements dominate in the upper part of the cone when maximum horizontal displacements appear at the upper transition concave-convex and in the bulge area.

That it is a long-term deformation, taking tens to thousand years considering the appropriate scaling and viscosities.

Preferential spreading is the most frequent case as perfect symmetry does not really exist in nature, or in the laboratory. The flank destabilization produced constitutes a major risk for these volcanoes. Small to huge catastrophic flank collapses can potentially occur, even if the volcano is dormant and thus not well monitored. Particular attention to volcanoes presenting such suspicious features and adapted monitoring are necessary to deal with such activity.

We have outlined similar deformation patterns on several volcanoes, confirming the reality of this phenomena. This leads to questions as regards the common horse-shoe structural features on volcanoes. It is of interest to re-examine such structures previously interpreted as collapse scars, as they could also be caused by flank spreading and be a pre- not a post-collapse feature.

References

- Alidibirov M, Dingwell DB, Stevenson RJ, Hess KU, Webb SL and Zinke J (1997) Physical properties of the 1980 Mount St Helens cryptodome magma. *Bulletin of Volcanology* 59: 103 - 111.
- Alvarado GE (2000) *Volcanes de Costa Rica*. pp 283.
- Alvarado GE and Leandro C (1999) Geological-geophysical study of an eastern and western section in the Arenal volcano. *Bol. OSIVAM* 20 - 21: 48 - 58.
- Borgia A and Linneman SR (1990) On the Mechanisms of Lava Flow Emplacement and Volcano Growth: Arenal, Costa Rica. Lava flows and domes emplacement; mechanisms and hazard implications. F. J. H. Berlin, Germany, Springer Verlag: pp 208 - 243.
- Cecchi E, van Wyk de Vries B and Lavest JM (2003) N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123: 181 - 201.
- Claudin P (1999) La physique des tas de sable; Description phénoménologique de la propagation des contraintes dans les matériaux granulaires. pp 241.
- Cobbold PR and Castro (1999) Fluid pressure and effective stress in sandbox models. *Tectonophysics* 301((1-2)): 1-19.
- Day (1996) Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes. *Volcano instability on the Earth and Other Planets*. W. J. Mc Guire, Jones, A.P. & Neuberger, J., Geological Society Special Publication. 110: pp 77 - 93.
- Donnadiou F, Kelfoun F, van Wyk de Vries B, Cecchi E and Merle O (2003) Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123: 161 - 180.
- Donnadiou F and Merle O (1998) Experiments on the indentation process during cryptodome intrusion: new insights into Mt St Helens deformation. *Geology* 26: 79-82.
- Fournier (1999) Hydrothermal Processes Related to Movement of Fluid From Plastic into Brittle Rock in the Magmatic-Epithermal Environment. *Economic Geology* 94(8): 1193-1211.
- Girard G (2002) Relations volcano-tectoniques entre le complexe volcanique Las Sierras-Masaya et le graben de Managua, Nicaragua. Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal. pp 50.
- Hazlet RH (1987) Geology of San Cristobal volcanic complex, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 33: 233 - 240.
- Hubbert MK (1937) Theory of scale models as applies to the study of geologic structures. *Geol. Soc. Am. Bull.* (48): 1459 - 1520.
- Komorowski JC, Norton G, Boudon G, Voight B, Watts R, Young S, Sparks S, Herd R and Walker C (1999) The 1997 flank-collapse of Soufriere Hills, Montserrat: Constraints on emplacement mechanisms from debris avalanche. Morphological and textural data. *Eos Trans. AGU Fall Meeting, San Francisco*.
- Lopez D and Williams SN (1993) Catastrophic volcanic collapse: relation to hydrothermal alteration. *Science* 260(5115): 1794-1796.
- Merle O and Borgia A (1996) Scaled experiments of volcanic spreading. *Journal of Geophysical Research* 101(B6): 13,805 - 13,817.
- Merle O and Lénat J-F (2003) Hybrid collapse mechanism at Piton de la Fournaise (Reunion Island, Indian Ocean). *Journal of Geophysical Research* (in press).
- Merle O and Vendeville B (1995) Experimental modelling of thin-skinned shortening around magmatic intrusions. *Bulletin of Volcanology* 57: 33 - 43.
- Murray JB, Voight B and Glot JP (1994) Slope movement crisis on the east flank of Mt Etna volcano: Models for eruption triggering and forecasting. *Engineering Geology* 38: 245-259.
- Petley DN (1996) The mechanics and Landforms of Deep-seated Landslides. *Advances in Hillslope Processes*.
- Petley DN and Allison RJ (1997) The mechanics of deep-seated landslides. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 747 - 758.
- Ramberg H (1981) Gravity deformation and the Earth's crust. Academic Press, San Diego, California, pp 452.
- Siebert L (1984) Large volcanic debris avalanches : characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22: 163 - 197.
- Siebert L, Glicken H and Ui T (1987) Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology* 49: 435 - 459.
- Swanson D, Hausback BP and Zimbelman DR (1995) Why was the 1980 bulge on the north flank of Mount St Helens? IUGGXXI Assembly (Int. Un. Geodesy Geophysics).
- Vallance KM, Kerle JW, Macias JL, Strauch W and Devoli G (2003) Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua - Flow bulking and transformation. *Bull. Geol. Soc. Am* (in press).
- van Wyk de Vries B and Francis PW (1997) Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature* 387: 387 - 390.
- van Wyk de Vries B, Kerle N and Petley D (2000) A sector collapse forming at Casita volcano, Nicaragua. *Geology* 28(2): 167 - 170.

- van Wyk de Vries B and Matela R (1998) Styles of volcano-induced deformation: numerical models of substratum flexure, spreading and extrusion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 1 - 18.
- van Wyk de Vries B and Merle O (1998) Extensional structures induced by volcanic loading in strike-slip fault zones. *Geology* 26: 983-986.
- Voight B, Ed. (1979) *Rockslides and avalanches*. Amsterdam, Elsevier pp 752.
- Voight B and Elesworth D (1997) Failure of volcano slopes. *Géotechnique* 47: 1-37.
- Wallace LK and Waythomas CF (1999) Geologic setting and characterization of a large volcanic debris avalanche deposit in the Copper River Basin, Alaska. *Eos Trans. AGU Fall Meeting*, San Francisco.
- Wohletz K and Heiken G (1992) *Volcanology and geothermal energy*. pp 432.

3.3 ÉTALEMENT GRAVITAIRE D'UN VOLCAN (VOLCANO SPREADING)

Deux types d'expériences concernant l'étalement d'un volcan ont servi à tester la nouvelle approche de reconstruction. Seul un bref rappel des phénomènes étudiés et des protocoles expérimentaux employés sera faite dans ce paragraphe, l'accent étant mis sur les reconstructions 3D obtenues et l'information qu'elles apportent aux deux types d'études.

L'étalement gravitaire d'un édifice volcanique est un phénomène reconnu depuis longtemps (van Bemmelen, 1954), qui fait l'objet de discussions et d'études récentes (Merle and Borgia, 1996, van Wyk de Vries and Francis, 1997, Borgia, 1994). De nombreux volcans subissent ce phénomène qui, pour résumer, se produit lorsque les composants d'un volcan et son environnement sont incapables de supporter sa charge. Il en résulte un étalement de l'édifice, correspondant à un mouvement d'extension général le long des pentes du volcan et même au-delà. Il est sous-entendu dans cette définition que seule une force passive, la gravité, est moteur de la déformation de l'édifice, alors que selon certains auteurs, l'étalement d'un volcan au sens large pourrait également être associé plus directement à son activité magmatique (forces mécanique et thermique liées aux complexes intrusifs, Borgia, 1994, Merle and Vendeville, 1995). Les zones de faiblesse nécessaires à l'étalement gravitaire peuvent exister avant la mise en place du volcan, comme c'est le cas pour un substratum ductile, ou peuvent être créées au sein du volcan : zones altérées, complexes intrusifs. Les structures de déformation produites sont variées et font souvent l'objet de controverses quant à leur interprétation sur le terrain. En effet, les facteurs d'étalement gravitaire d'un édifice peuvent être d'origines diverses, et il est parfois délicat d'attribuer certaines figures structurales au phénomène. La modélisation analogique est alors un des moyens permettant de déterminer le rôle des différents facteurs, et de caractériser les structures de déformation associées.

3.3.1 PHÉNOMÈNES D'ÉTALEMENT ET DE SUBSIDENCE DES ÉDIFICES VOLCANIQUES (SPREADING ET SAGGING)

Quatre expériences concernant le phénomène général d'étalement (spreading) sont réalisées. Ces expériences sont inspirées de Merle et al. (Merle et al., 1996) et des modèles numériques de van Wyk de Vries et al. (van Wyk de Vries and Matela, 1998). Elles mettent l'accent sur la transition entre le phénomène d'étalement et celui de subsidence (sagging) d'un édifice reposant sur un substratum ductile (van Wyk de Vries et al., 2003), et visent à décrire les structures de déformation associées à l'étalement de cônes volcaniques au profil « réaliste » (Figure 3-2). En effet, dans une telle configuration, l'épaisseur du substratum ductile conditionne le passage d'un phénomène de subsidence à un phénomène d'étalement, ainsi que le type de structures de déformation associées. La Figure 3-2 schématise le dispositif expérimental utilisé.

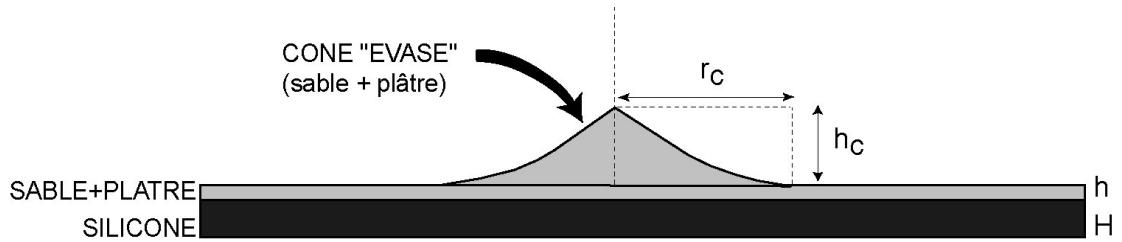


FIGURE 3-2 : SCHÉMA D'UNE EXPÉRIENCE CONCERNANT L'ÉTALEMENT D'UN VOLCAN REPOSANT SUR UN SUBSTRATUM DUCTILE. H ET h SONT LES ÉPAISSEURS RESPECTIVES DE LA COUCHE DUCTILE ET DE LA COUCHE FRAGILE. h_c ET r_c SONT LA HAUTEUR ET LE RAYON DU CÔNE VOLCANIQUE.

Les expériences se réfèrent aux travaux de Merle et al. (Merle et al., 1996) pour ce qui est du dimensionnement. Dans les quatre expériences, seule l'épaisseur de la couche ductile varie (Tableau 3-1).

Expérience	Substratum fragile h (m)	Substratum ductile H (m)	h / H	Nombre de séries de vues
SV1	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	0.05	5
SV2	$1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	0.07	5
SV3	$1 \cdot 10^{-3}$	$0.4 \cdot 10^{-2}$	0.25	5
SSV	$1 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-2}$	0.025	3

TABLEAU 3-1 : LES QUATRE EXPÉRIENCES CONCERNANT L'ÉTALEMENT D'UN CÔNE SUR UN SUBSTRATUM DUCTILE : SV1, SV2, SV3, SSV. VARIATIONS DE L'ÉPAISSEUR DU SUBSTRATUM DUCTILE ET NOMBRE DE SÉRIES DE VUES POUR CHAQUE EXPÉRIENCE.

Pour chaque expérience, plusieurs séries de vues successives, chacune composées de 10 à 13 images, sont réalisées (Tableau 3-1 et Figure 3-3).

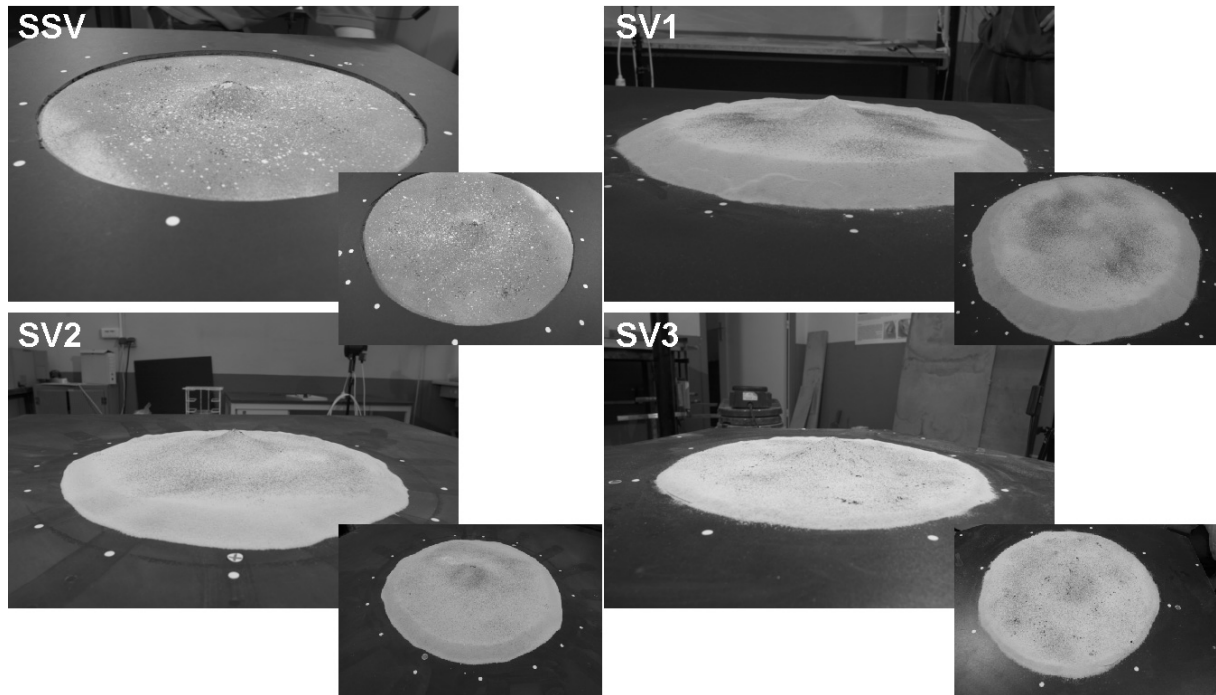


FIGURE 3-3 : LES QUATRE EXPÉRIENCES D'ÉTALEMENT D'UN CÔNE SUR UN SUBSTRATUM DUCTILE :
EXEMPLE DE PHOTO D'UNE DES ACQUISITIONS POUR CHAQUE EXPÉRIENCE.

Les résultats de reconstruction 3D apparaissent dans la Figure 3-4 (SSV), la Figure 3-5 (SV1), la Figure 3-6 (SV2) et la Figure 3-7 (SV3). Seuls les résultats de l'expérience SV3 sont montrés dans leur totalité (5 reconstructions), car elle constitue l'expérience la plus complexe du point de vue de la morphologie finale du modèle analogique. Les reconstructions 3D correspondent à des modèles constitués de plus de 30000 facettes triangulaires (Résolution $R = 6$). A cette résolution, le côté d'un triangle représente quelques pixels (5 à 10 pixels) dans les images, ce qui correspond pratiquement à la limite de résolution du modèle, puisque la taille moyenne d'un grain de sable dans les expériences (0.3 mm) équivaut à environ un pixel. La déformation selon Z est représentée sous forme de cartes dans les figures suivantes : Figure 3-8(SSV), Figure 3-9 (SV1), Figure 3-10(SV2) et Figure 3-11 (SV3).

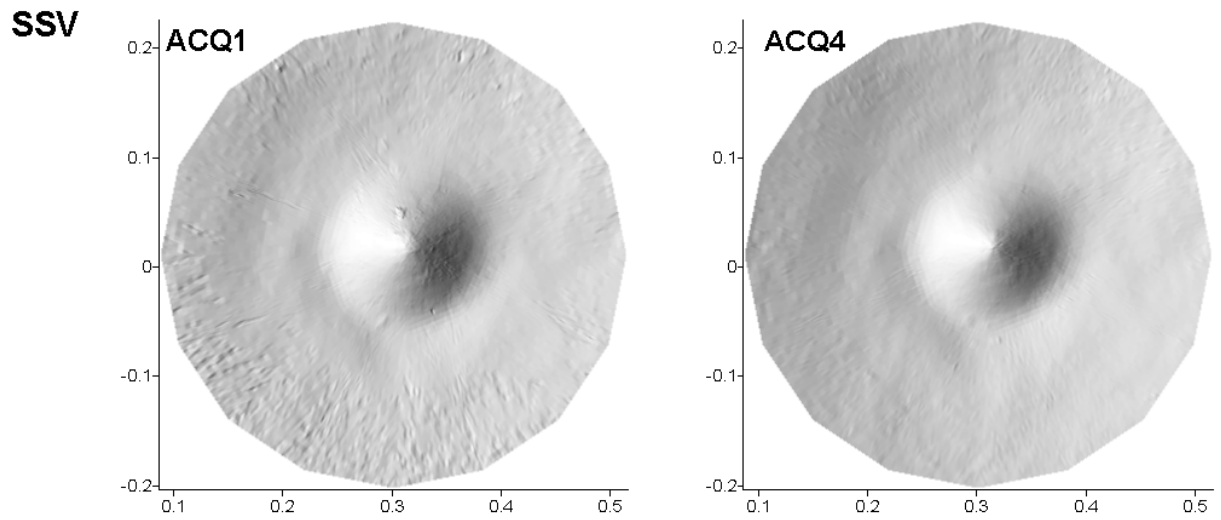


FIGURE 3-4 : EXPÉRIENCE SSV : RECONSTRUCTIONS INITIALE ET FINALE.

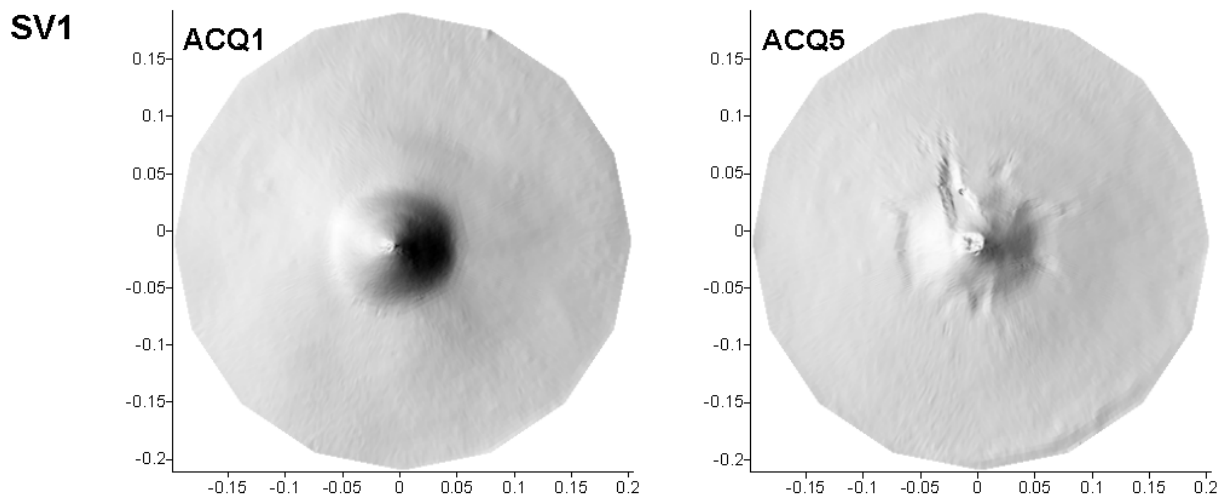


FIGURE 3-5 : EXPÉRIENCE SV1 : RECONSTRUCTIONS INITIALE ET FINALE.

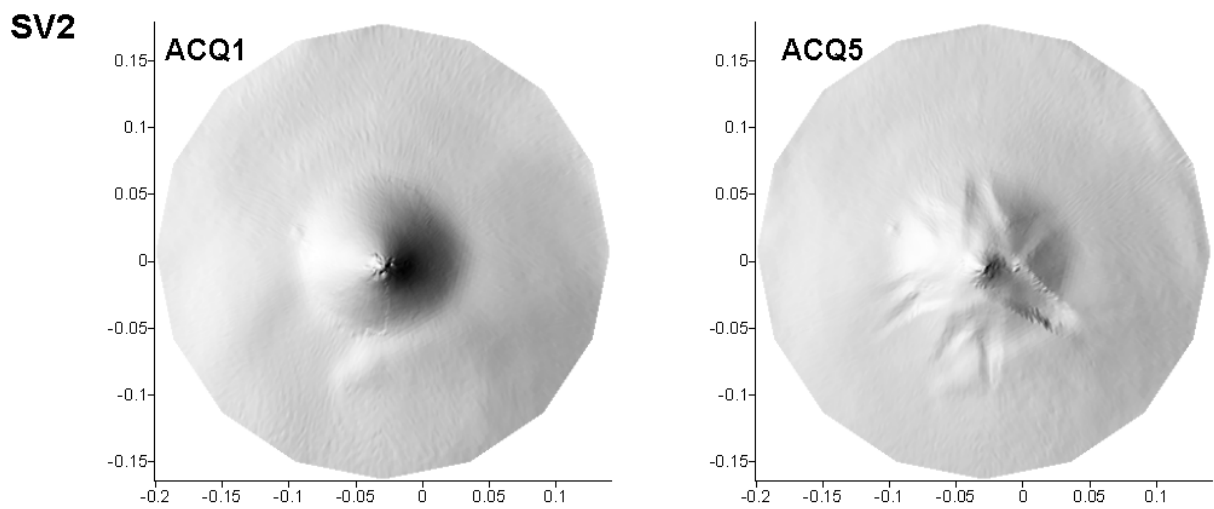


FIGURE 3-6 : EXPÉRIENCE SV2 : RECONSTRUCTIONS INITIALE ET FINALE.

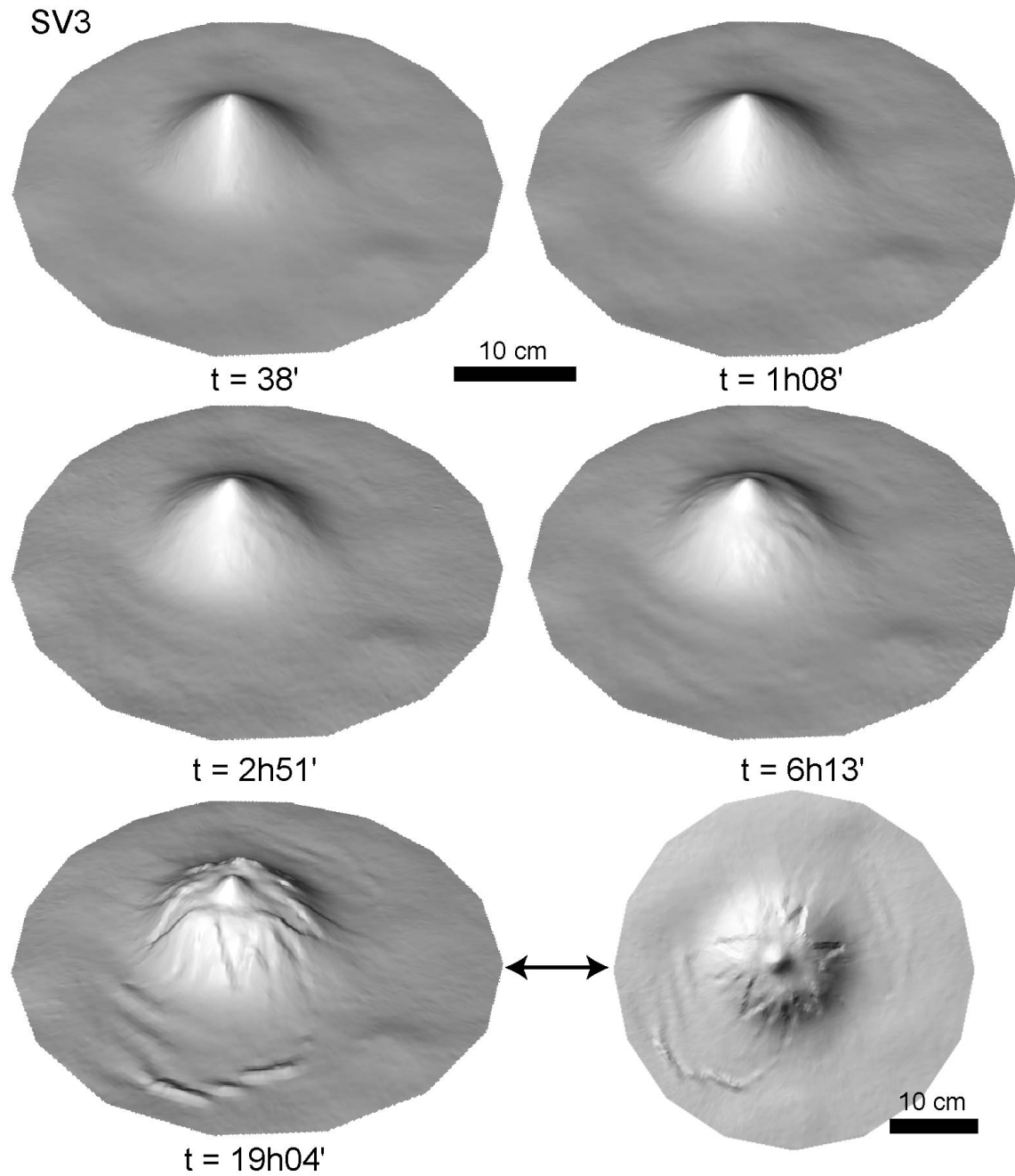


FIGURE 3-7 : EXPÉRIENCE SV3 : LES 5 MNT RÉALISÉS, REPRÉSENTÉS EN 3D. LA RECONSTRUCTION FINALE EST ÉGALEMENT REPRÉSENTÉE EN 2D POUR PERMETTRE UNE COMPARAISON AVEC LA FIGURE 3-4, LA FIGURE 3-5 ET LA FIGURE 3-6.

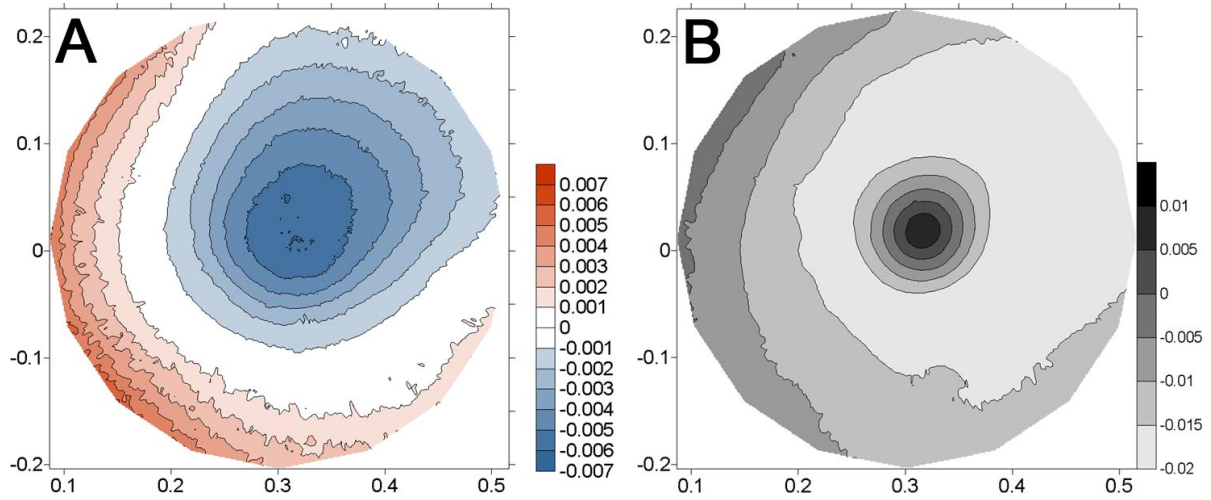


FIGURE 3-8 : EXPÉRIENCE SSV : CARTE DE DÉFORMATION EN Z (A) ET TOPOGRAPHIE INITIALE (B) MONTRANT LE PHÉNOMÈNE DE SUBSIDENCE ET L'ASYMÉTRIE LIÉE À LA TOPOGRAPHIE INITIALE. SEULE LA DÉFORMATION ENTRE LES DEUX PREMIÈRES ACQUISITIONS EST MONTRÉE, CAR ENSUITE UN ÉQUILIBRE EST ATTEINT ET LA SUBSIDENCE EST STOPPÉE. CHAQUE NIVEAU CORRESPOND À UNE VARIATION DE 1 MM (PAS), LE ROUGE CORRESPONDANT À UNE DÉFORMATION POSITIVE, LE BLEU À UNE DÉFORMATION NÉGATIVE. LA DÉTECTION DE LA DÉFORMATION EST INFÉRIEURE À 1 MM, MAIS EST REPRÉSENTÉE AINSI POUR PLUS DE CLARTÉ.

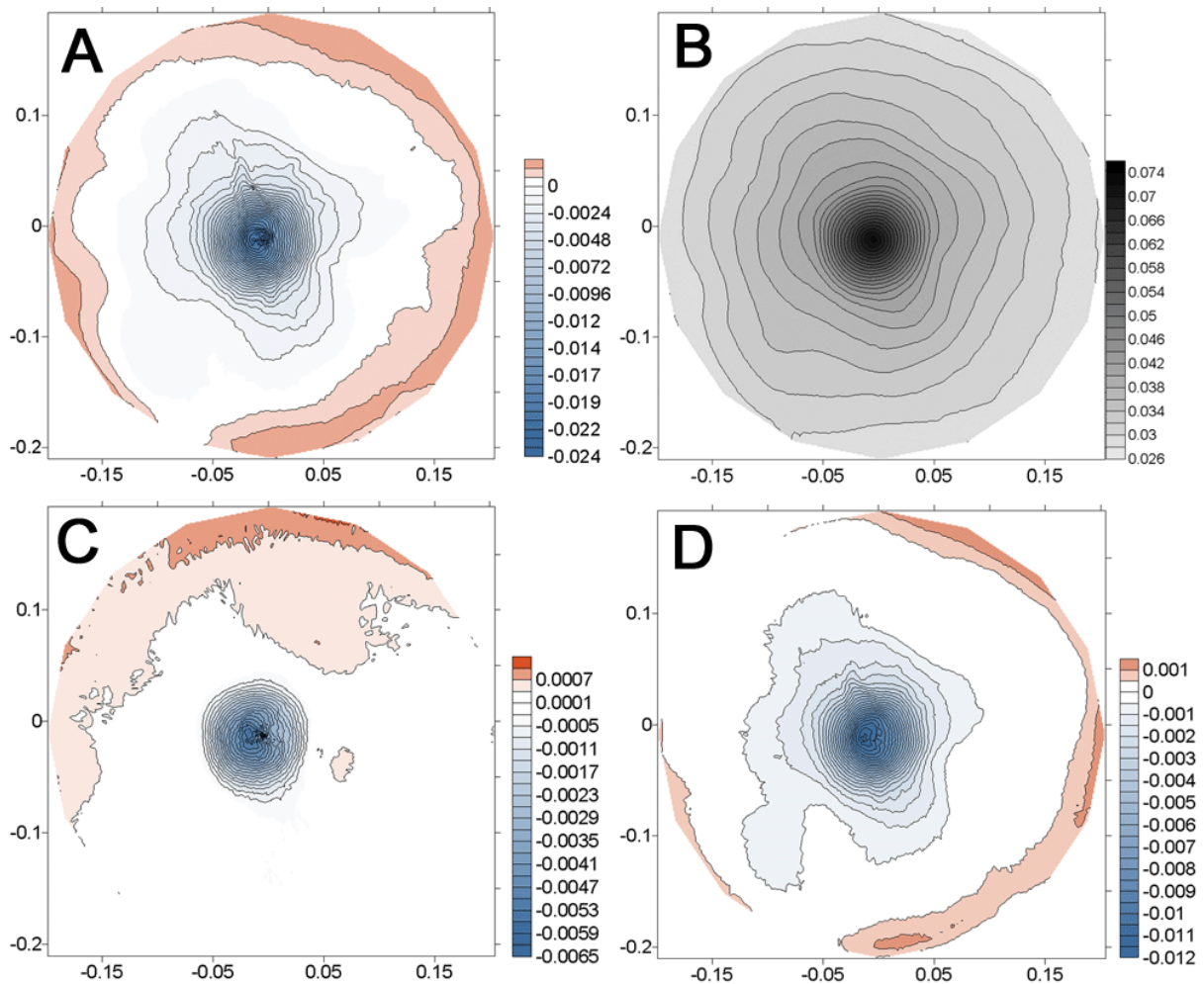


FIGURE 3-9 : EXPÉRIENCE SV1 : CARTES DE DÉFORMATION EN Z ET TOPOGRAPHIE INITIALE. (A) : DÉFORMATION TOTALE EN Z ENTRE LE DÉBUT ET LA FIN DE L'EXPÉRIENCE. 1 NIVEAU = 0.8 MM. (B) : TOPOGRAPHIE INITIALE DU MODÈLE ANALOGIQUE. (C) ET (D) : CARTES DE DÉFORMATION EN Z ENTRE LES ACQUISITIONS 1 ET 2 (1 NIVEAU = 0.3 MM), ET LES ACQUISITIONS 2 ET 3 (1 NIVEAU = 0.5 MM). CES DEUX CARTES MONTRENT L'ASYMÉTRIE DU FLUAGE DE LA SILICONE EN BORDURE DU MODÈLE.

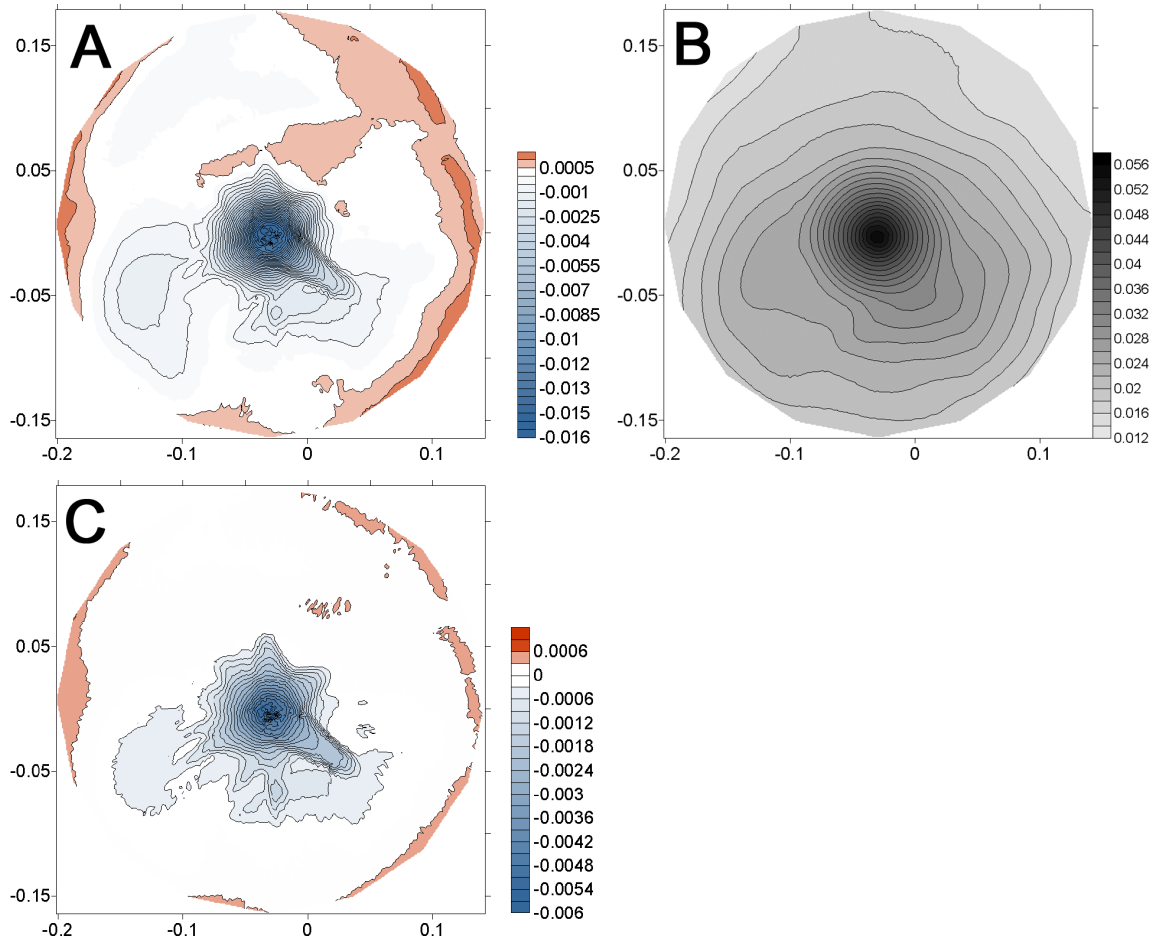


FIGURE 3-10 : EXPÉRIENCE SV2 : CARTE DE DÉFORMATION EN Z ET TOPOGRAPHIE INITIALE. (A) : CARTE DE DÉFORMATION EN Z ENTRE LE DÉBUT ET LA FIN DE L'EXPÉRIENCE. 1 NIVEAU = 0.5 MM. (B) : TOPOGRAPHIE INITIALE DU MODÈLE. (C) : CARTE DE DÉFORMATION ENTRE LES ACQUISITIONS 3 ET 5 MONTRANT LE DÉVELOPPEMENT DES GRABENS. 1 NIVEAU = 0.3 MM.

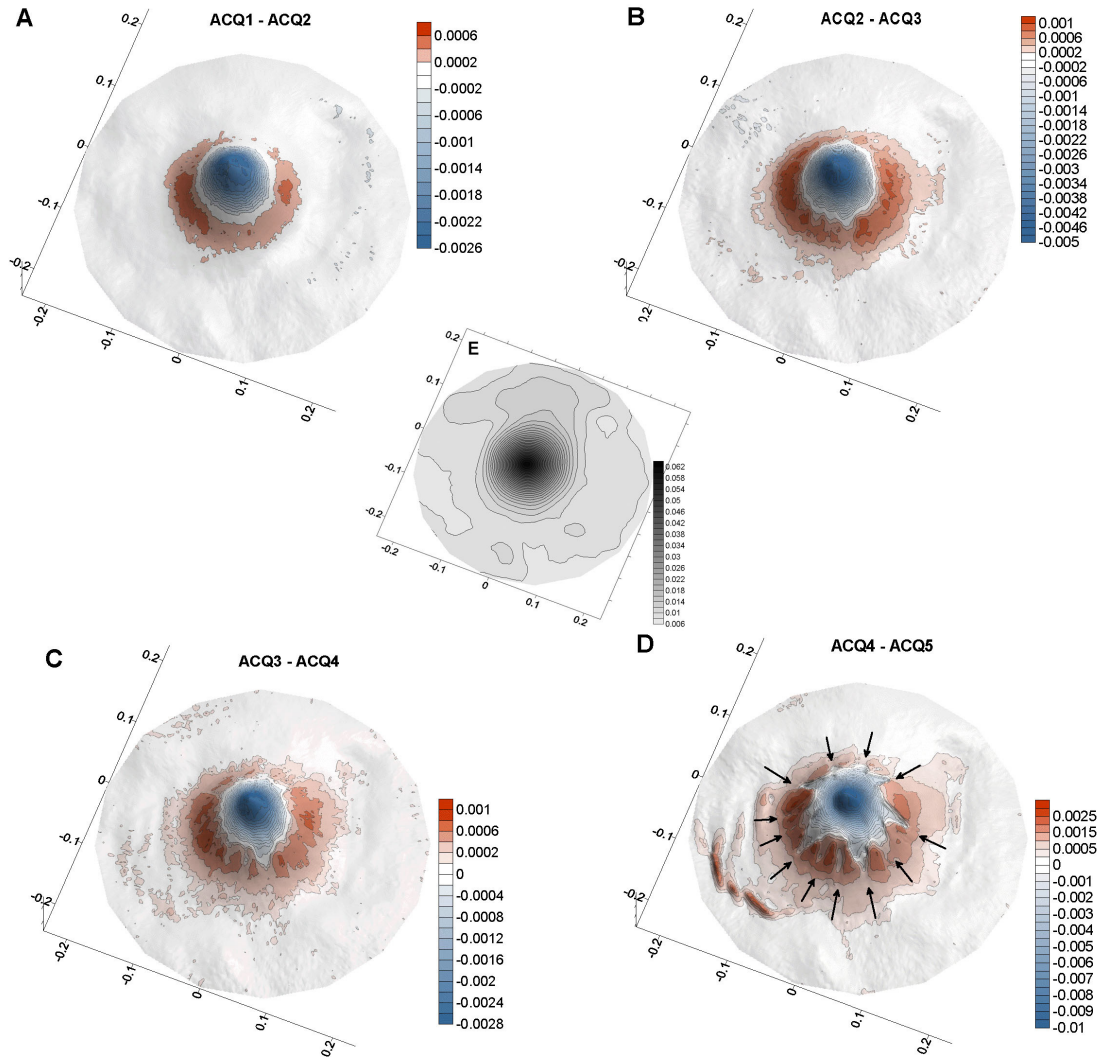


FIGURE 3-11 : EXPÉRIENCE SV3 : CARTES DE DÉFORMATION EN Z RÉALISÉES ENTRE CHACUNE DES ACQUISITIONS SUCCESSIVES ET PROJETÉES SUR LES MNT CORRESPONDANTS. DÉFORMATIONS ENTRE LES ACQUISITIONS 1 ET 2 (A), 2 ET 3 (B), 3 ET 4 (C), 4 ET 5 (D). LES FLÈCHES SUR LA DERNIÈRE CARTE DE DÉFORMATION (D) INDIQUENT LA POSITION DES GRABENS. CHAQUE NIVEAU = 0.2 MM, SAUF POUR (D) OÙ 1 NIVEAU = 0.5 MM. (E) TOPOGRAPHIE INITIALE DU MODÈLE MONTRANT UNE ASYMÉTRIE : LE POIDS DU SUBSTRATUM EST PLUS IMPORTANT SELON UN AXE NO-SE, NOTAMMENT AU NO.

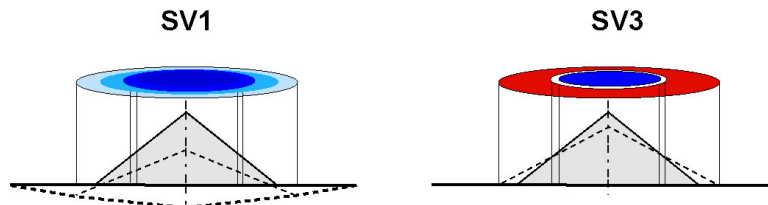


FIGURE 3-12 : SCHÉMAS SIMPLIFICATEURS DE L'ÉTALEMENT D'UN CÔNE ET LA DÉFORMATION EN Z ENGENDRÉE. (A) CAS D'UNE COUCHE DUCTILE ÉPAISSE (SV1). SEULE UNE VARIATION EN Z NÉGATIVE EST ENREGISTRÉE AU NIVEAU DU CÔNE. (B) CAS D'UNE COUCHE DUCTILE TRÈS MINCE (SV3). LA DÉFORMATION EST NÉGATIVE AU SOMMET DU CÔNE ET POSITIVE DANS SA PARTIE INFÉRIEURE. LE CÔNE INITIAL EST EN GRISÉ ET LE CÔNE FINAL EN POINTILLÉ.

D'un point de vue expérimental, on observe un phénomène d'étalement dans les expériences SV1, SV2 et SV3, avec une complexité des structures de déformation qui augmente lorsque la couche ductile devient plus mince, traduisant un étalement plus prononcé. Aucune structure de déformation apparente n'est par contre visible sur les modèles 3D de l'expérience SSV (Figure 3-4). Cette dernière traduit un phénomène de subsidence visible sur la carte de déformation (Figure 3-8). Une légère asymétrie est visible et est liée à la topographie initiale comme le montre Figure 3-8B : le cône est légèrement étiré vers le NE. La topographie du premier MNT indique que la subsidence a débuté avant la première acquisition d'images (substratum non horizontal).

Les structures de déformation

Les structures d'étalement que l'on observe sont de deux types : (1) des figures d'extension apparaissent sur le cône et se prolongent dans le substratum. Ces figures sont des failles normales formant des grabens, ainsi que des fractures se développant dans le prolongement de ces grabens. Le nombre de grabens augmente lorsque la couche ductile diminue, c'est-à-dire lorsque le phénomène d'étalement devient plus fort : 8 grabens sont visibles dans l'expérience SV2, alors que dans SV3, 12 grabens se sont formés, dont 7 particulièrement bien développés (Figure 3-11). (2) Des figures de compression sont visibles dans le substratum sous forme de ridules concentriques au cône lorsque l'étalement est important (SV3, Figure 3-7), mais également en bordure de modèle (expériences SV1 et SV2, Figure 3-5, Figure 3-6, Figure 3-9 et Figure 3-10). Ces dernières correspondent au fluage de silicone en bordure des modèles. Cette figure est absente de l'expérience SV3 car la couche ductile est extrêmement faible, et donc le fluage indétectable en bordure du modèle. Les ridules concentriques correspondent à des chevauchements se développant uniquement quand l'étalement est fort, et quand il y a une concentration des contraintes.

Contrairement aux travaux de Merle et al. (Merle et al., 1996), les expériences d'étalement réalisées présentent très peu de chevauchements. Cette caractéristique provient d'une part de la morphologie plus réaliste des cônes utilisés : il n'y a pas de rupture de pente abrupte entre le cône et le substratum, constituant une concentration des contraintes en partie responsable de la formation de chevauchements. D'autre part, les modèles sont moins confinés dans l'espace, contrairement aux expériences de Merle et al. (1996), et ceci inhibe la formation de chevauchements.

Des observations visuelles complémentaires des modèles en temps réel montrent une micro-fracturation en échelons au niveau des failles normales. Cette observation, ainsi que le suivi manuel de points particuliers du modèle dans des images successives indiquent une composante décrochante des failles normales (van Wyk de Vries, com. pers.).

Dans chacune des expériences, les cartes de déformation en Z montrent l'influence de la topographie initiale sur le développement de la déformation. L'asymétrie visible dans l'expérience SSV a déjà été évoquée plus haut (Figure 3-8). Dans l'expérience SV1, le relief initial du substratum indique une charge plus importante selon deux axes perpendiculaires orientés NO-SE et NE-SO. Cette figure en croix se retrouve dans le développement préférentiel des structures d'étalement (Figure 3-9A). Quant à l'expérience SV2, le substratum montre aussi initialement un relief plus prononcé au SO, et surtout

au SE (Figure 3-10B) se traduisant par le développement d'un graben plus prononcé au SE et d'une zone en légère dépression au SO (Figure 3-10A). Enfin, la position des chevauchements du substratum de l'expérience SV3 peut s'expliquer par une répartition initiale inégale de la charge : celle-ci est plus faible là où vont apparaître les chevauchements, au SO et au NE (Figure 3-11 D et E). Cette influence de la topographie initiale sur la déformation n'est pas une conclusion surprenante en soit, mais n'est cependant possible que grâce à la réalisation de reconstructions 3D très précises. Les variations de relief observées sont en effet millimétriques (courbes de niveaux tous les 2 mm pour SV3 par exemple, Figure 3-11E). On a pu observer qu'un très léger déséquilibre dans la répartition des charges a une influence considérable dans les structures de déformation développées. Cette observation est cruciale et doit être présente à l'esprit lors de l'interprétation des structures sur le terrain : en effet, aucun volcan n'est parfaitement symétrique, et les structures qu'il développe auront tendance à suivre la topographie de l'édifice.

L'étalement est dû à un fluage de la couche ductile vers l'extérieur du modèle, sous le poids de l'édifice et du substratum fragile. Si la couche ductile est suffisamment épaisse, un phénomène de subsidence de l'édifice tout entier se produit (expériences SV1 et SV2, Figure 3-9 et Figure 3-10). Dans l'expérience SV3, seule la partie sommitale de l'édifice subside car la couche ductile est très mince. La Figure 3-12 explique très schématiquement la différence de déformation en Z entre SV1 et SV3. Les cartes de déformation montrent également que ce fluage varie au cours du temps. Les cartes de déformation (C) et (D) Figure 3-9 entre trois reconstructions successives de l'expérience SV1 illustrent ce phénomène : une variation positive est tout d'abord enregistrée en bordure du modèle, dans sa moitié Nord-Ouest (Figure 3-9C), puis dans sa moitié Est (Figure 3-9D). Il faut souligner que pour la carte Figure 3-9D, le laps de temps entre les deux reconstructions est beaucoup plus grand que pour la carte Figure 3-9C (20 minutes versus 2h20), expliquant l'étendue importante de la zone positive.

La limite de détection des variations en Z est variable selon les expériences et dépend de la précision de reconstruction des modèles. On observe que des informations infra-millimétriques, impossibles à voir à l'œil nu, sont détectées : chaque niveau représente 0.2 mm dans la Figure 3-11A par exemple (expérience SV3). Inversement, on peut se servir de ces cartes de déformation pour avoir une indication sur la précision de reconstruction. Les tests de précision effectués sur des modèles de géométrie connue (paragraphe 2.5 chapitre 2) concordent avec les valeurs de variations en Z détectées.

D'un point de vue plus photogrammétrique, on observe certaines perturbations dans les modèles pouvant s'expliquer par les raisons suivantes :

(1) Une influence de la texture sur la qualité de la reconstruction. En effet, on observe que les reconstructions de SV1 et SV2 sont plus perturbées que celles de SV3. L'aspect est plus « lisse » sur ces dernières. La Figure 3-3 montre que la texture est plus riche pour SV3 que pour SV1 et SV2. On parlera plus particulièrement de macro et micro texture : toutes deux sont souhaitables pour un bon

fonctionnement de la mise en correspondance, ce qui est le cas pour SV3. On remarque également une petite perturbation du sommet de SV1 que l'on peut corrélérer au manque de macro texture : dans l'expérience SV2, quelques grains plus sombres ont été parsemés sur le sommet et la reconstruction de celui-ci n'est plus perturbée.

(2) Une sensibilité de la reconstruction à la configuration de prise de vues dans certains cas. En effet, cette conclusion concerne l'expérience SSV. On voit que la première acquisition donne lieu à une reconstruction perturbée au niveau du substratum alors que la dernière reconstruction l'est beaucoup moins (Figure 3-4), pour une texture équivalente et un même nombre d'images. Les seules différences que l'on a pu noter entre ces deux acquisitions sont la présence de flou en bordure de modèle dans les images de l'acquisition 4, et une répartition des vues dans l'espace moins régulière pour l'acquisition 1. L'hypothèse expliquant la perturbation du premier MNT est la suivante : nous sommes dans un cas limite concernant l'acquisition 1, car l'espacement entre les vues sélectionnées pour la mise en correspondance est trop important, du fait de la prise de vues moins régulière dans l'espace. Un nombre de vues plus grand serait préférable pour éviter ce genre de cas limites, notamment des vues « hautes » pour des modèles présentant de vastes surfaces horizontales. Il est bon de garder à l'esprit que la prise de vues doit s'adapter à la configuration géométrique du modèle à reconstruire. Le flou dans les images a pu jouer un rôle en améliorant la qualité de la reconstruction finale : la mise en correspondance est facilitée par un lissage de la texture lié au flou, ce qui a pu compenser un espacement important des vues.

(3) une irrégularité du maillage. La perturbation des modèles reconstruits semble en effet aller croissant de SSV à SV3, ce qui peut être corrélé à un déséquilibre de plus en plus important entre les facettes du cône et celles du substratum de SSV à SV3 (Figure 3-13). Cette irrégularité du maillage est créée à l'initialisation du modèle 3D, réalisé manuellement grâce à un outil interactif intégré au logiciel, et permettant une adaptation simple et rapide d'un cône parfait au modèle analogique étudié.

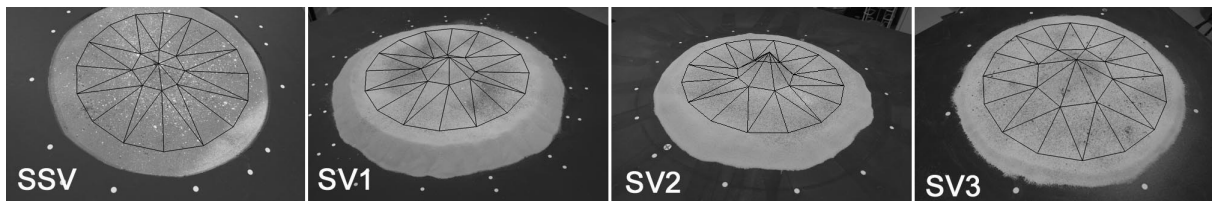


FIGURE 3-13 : PHOTOS DES 4 EXPÉRIENCES D'ÉTALEMENT D'UN ÉDIFICE SUR UN SUBSTRATUM DUCTILE ET LE MODÈLE INITIAL PROJÉTÉ DANS CHAQUE CAS. ON VOIT QUE LE DÉSÉQUILIBRE ENTRE LES FACETTES DU CÔNE ET DU SUBSTRATUM EST CROISSANT DE SV3 À SSV (DE DROITE À GAUCHE).

3.3.2 UN CAS PARTICULIER D'ÉTALEMENT

Un deuxième type d'expériences concernant l'étalement gravitaire permet de tester la reconstruction 3D. Il s'agit d'une modélisation analogique appliquée à un cas naturel particulier : l'Etna, Italie. La modélisation, développée par Murray (Murray, 2002) a pour objectif de reproduire les structures

tectoniques observées à l'Est du volcan, en l'occurrence la Valle del Bove. L'hypothèse avancée pour la formation de cette vallée est celle d'un phénomène d'étalement du volcan, hypothèse déjà suggérée par Merle et al. (Merle et al., 1996). L'étalement a ceci de particulier dans la présente modélisation : il est provoqué à la fois par un substratum ductile correspondant aux argiles sub-étrnéennes situées au Sud et à l'Est du volcan, et par la présence d'une zone de faiblesse au sein de l'édifice, dans sa partie SE, correspondant à un ancien complexe volcanique appelé Trigoglietto. La Figure 3-14 schématise la configuration géométrique d'une expérience de ce type.

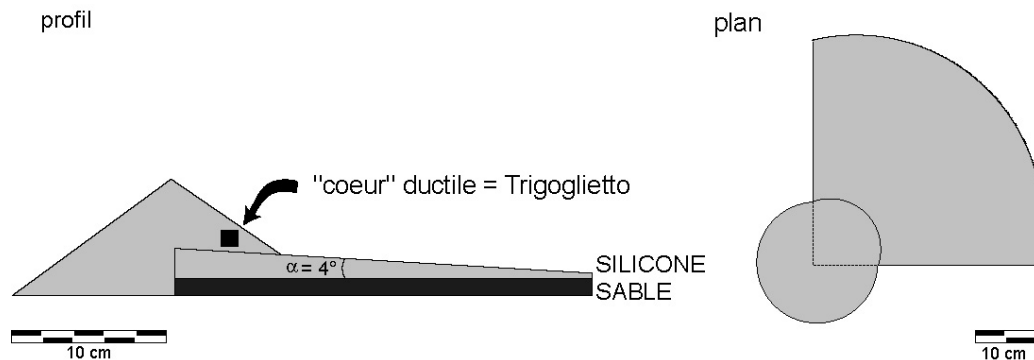


FIGURE 3-14 : EXPÉRIENCE D'ÉTALEMENT APPLIQUÉ À L'ÉTNA (Murray, 2002). SCHÉMA D'UN MODÈLE.

Cinq acquisitions de vues, chacune comprenant entre 12 et 16 images (16 images pour les dernières acquisitions), sont réalisées, permettant la réalisation de cinq reconstructions successives (Figure 3-15). Les reconstructions initiale et finale sont présentées Figure 3-16.

Structures observées

On observe que la déformation a déjà débuté à la première acquisition d'images : une fracture est apparue à l'arrière du sommet du cône. Les structures de déformation en fin d'expérience sont complexes. Le quart NE du cône s'est étalé et a développé un large graben sommital orienté NO-SE, se prolongeant au Nord et à l'Est dans le substratum. Une série de fractures en échelons est clairement visible et forme la faille principale au Nord délimitant la partie non déformée du modèle et la partie qui s'étale. Quatre grabens se sont également développés à la base du cône, et les failles normales qui les composent se prolongent relativement loin dans le substratum. Le schéma de la Figure 3-16, réalisé à partir du MNT final, synthétise les diverses figures structurales apparues. La carte de déformation en Z (Figure 3-17) montre une détection infra millimétrique des mouvements selon Z. Le fluage de la silicone produit en bordure du modèle une élévation totale d'environ 3 mm. Deux zones de déformation positive importante (>4 mm) à la base du volcan peuvent être interprétées comme des chevauchements. Ces zones apparaissent d'ailleurs au tout début de la déformation et se développent progressivement (Figure 3-17B).

Interprétation géologique des résultats

Bien que la modélisation ne tienne pas compte de certaines caractéristiques importantes de l'édifice susceptibles d'entrer en jeu dans la déformation de l'Etna, telles que la tectonique régionale, les intrusions de magma ou un cœur hydrothermal altéré par exemple, certaines figures de déformation du modèle peuvent se rapprocher des structures réelles de l'édifice. Les grabens développés dans le modèle en sont un exemple. Ces grabens présentent un mouvement décrochant, apparaissant sous la forme de fractures en échelons, et constituent des figures similaires à celles visibles au niveau de la Valle del Bove, où les données GPS et de nivellement indiquent un phénomène de subsidence et un mouvement décrochant (Wooller, com. pers.). Les bords du modèle représentent le système de failles de Pernicana au Nord de l'Etna, et le système de failles de Trecastagni au Sud. La faille Pernicana débute au niveau du rift NE, dans une zone de dépression en forme de feuille, que l'on interprète comme étant un graben. Alors qu'une cartographie précise des fractures du rift existe, la partie Est de ce graben n'a pas fait l'objet jusqu'à présent de beaucoup d'attention. Une cartographie et des mesures GPS de cette région seraient nécessaires pour mettre en évidence une éventuelle déformation du type de celle rencontrée dans les modèles analogiques. Contrairement à cette partie Nord de l'Etna, la déformation au Sud de l'édifice est moins nette, et est associée à un anticlinal (Anticlinal de Misterbianco). Cette différence entre les modèles et le terrain pourrait être liée à l'extension des sédiments sous l'Etna. En effet, si le bassin « plonge » vers l'intérieur de l'édifice (forme concave dirigée vers le centre de l'Etna), alors un régime de transpression tend à être créé au Sud du volcan. Ceci pourrait inhiber la formation de grabens dans cette région et engendrer une déformation plus diffuse au niveau des failles décrochantes.

La partie centrale des modèles est caractérisée par plusieurs grabens, alors que la Valle del Bove n'en constitue qu'un. Ces grabens se rejoignent dans les modèles au niveau de la partie sommitale de l'édifice, et pourraient être considéré comme étant un seul et même graben présentant des horsts. Dans d'autres expériences du même type, Murray (Murray, 2002) produit d'ailleurs une seule structure de graben, montrant une forte sensibilité de cette région centrale à de petites variations géométriques. La Valle del Bove est sujette à des phénomènes d'érosion importants, à un possible glissement et étalement de flanc, constituant autant de facteurs qui devraient être pris en compte dans le cadre d'une comparaison entre la modélisation et la nature. Il est raisonnable de penser que la zone de dépression modélisée sur le flanc puisse évoluer d'une manière similaire à la Valle del Bove. Notons que la découverte de horsts au sein de cette vallée pourrait être intéressante quant à l'interprétation des modèles.

Les chevauchements à la base du volcan dans les modèles sont probablement dus à la rupture nette de pente entre le cône et le substratum (van Wyk de Vries et al., 2003), ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Quant au chevauchement visible en bordure du modèle, celui-ci se développe car la couche de silicone bute contre un rempart de sable constituant la limite du modèle. Cette dernière figure n'apparaît pas à l'Est de l'Etna, où les argiles sub-etnéennes s'étendent dans le bassin Tyrhénéen, mais peut être assimilée au chevauchement et à l'anticlinal de Misterbianco au Sud du volcan, précisément là où les argiles butent contre des formations gréseuses.

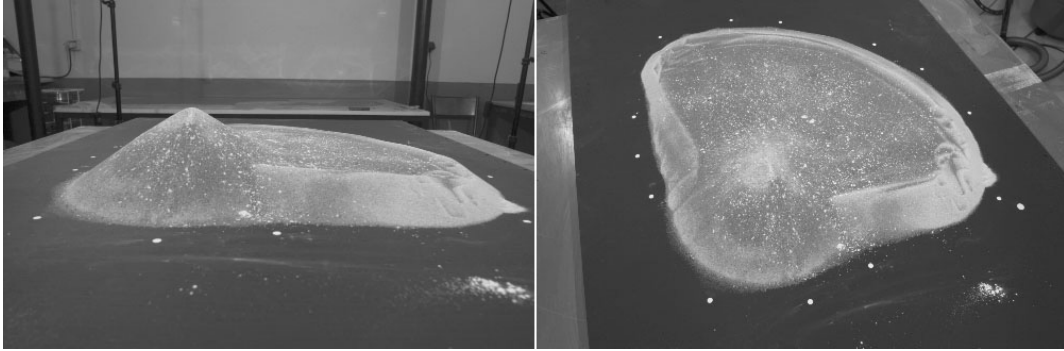


FIGURE 3-15 : EXPÉRIENCE SUR L'ÉTALEMENT : APPLICATION À L'ÉTNA. EXEMPLES DE VUES APPARTENANT À LA PREMIÈRE ACQUISITION.

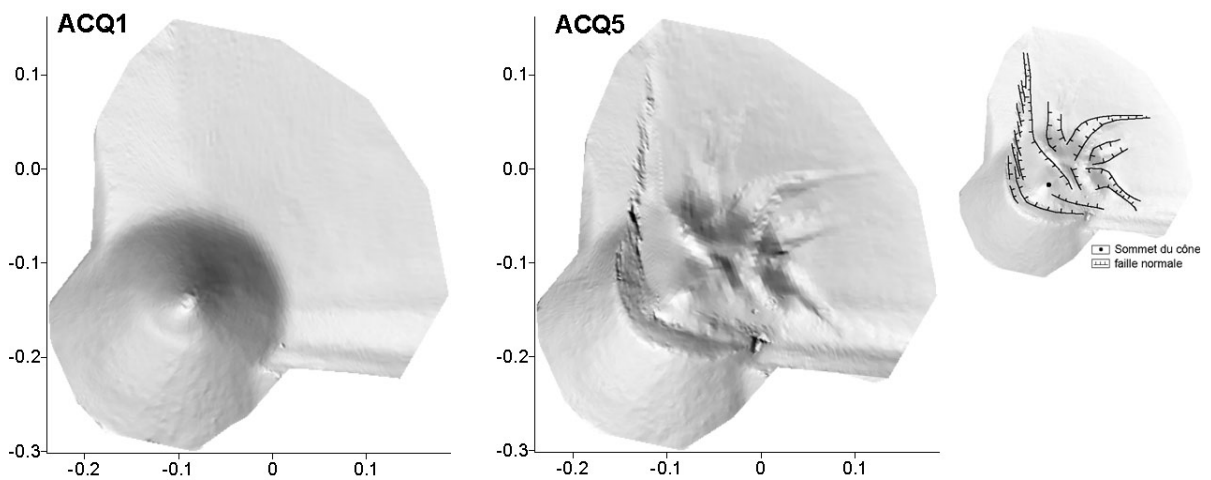


FIGURE 3-16 : MNT INITIAL ($T=0'$) ET FINAL ($T=4H38'$) DE L'EXPÉRIENCE SUR L'ÉTALEMENT DE L'ÉTNA ET SCHÉMA STRUCTURAL DU MNT FINAL.

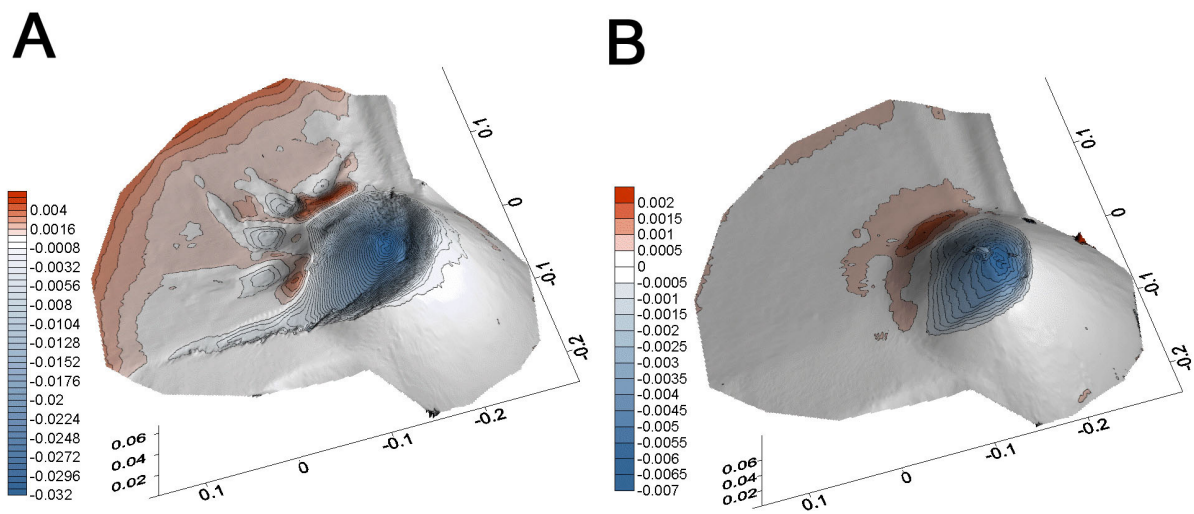


FIGURE 3-17 : CARTE DE DÉFORMATION SELON Z. (A) ENTRE LE DÉBUT ET LA FIN DE L'EXPÉRIENCE À PARTIR DES RECONSTRUCTIONS 3D. CHAQUE NIVEAU CORRESPOND À 0.8 MM. (B) ENTRE LES DEUX PREMIÈRES ACQUISITIONS. CHAQUE NIVEAU CORRESPOND À 0.5 MM.

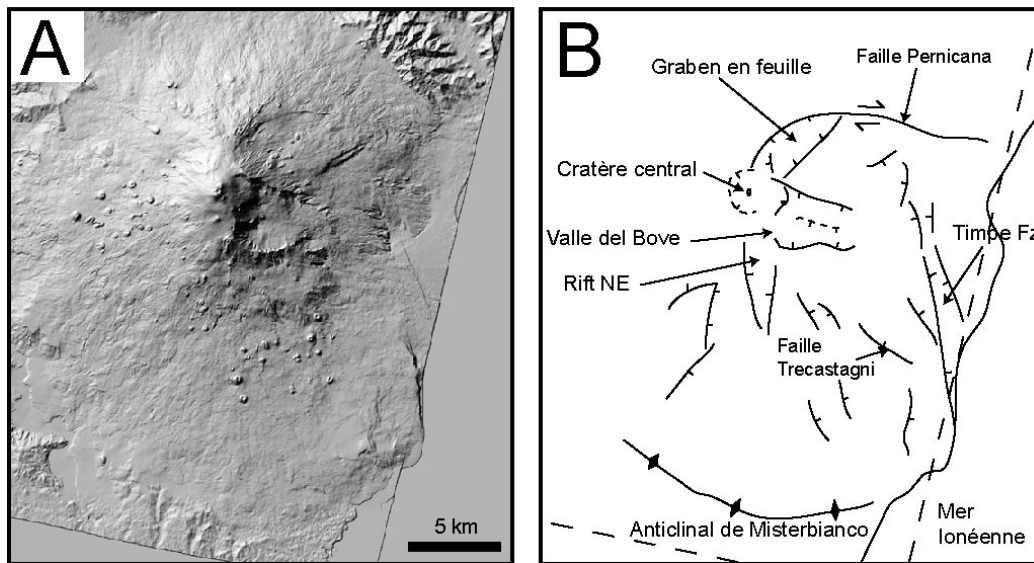


FIGURE 3-18 : STRUCTURES SUR L'ÉTNA. (A) : MNT DE L'ÉTNA. (B) : SCHÉMA STRUCTURAL DE L'ÉTNA, MONTRANT LA FAILLE PERNICANA ET LE GRABEN EN FORME DE FEUILLE PROCHE DU RIFT NE ; LA VALLE DEL BOVE, AVEC UNE FAILLE NORMALE CENTRALE OU HORST RÉMANENT ; ANTICLINAL DE MISTERBIANCO AU SUD ET LE SYSTÈME DE FAILLES DE TRECASTAGNI. ON PEUT NOTER UNE CORRESPONDANCE ENTRE LES STRUCTURES AU NORD DE L'ÉTNA ET CELLES DES MODÈLES ANALOGIQUES. UN RAPPROCHEMENT DES STRUCTURES EST PLUS DIFFICILE POUR LA PARTIE SUD DE L'ÉTNA.

Conclusions sur la reconstruction du modèle analogique

Les structures de déformation, malgré leur complexité, ont été reconstruites avec succès. La reconstruction 3D de la couche de silicone a également été effectuée (Figure 3-20). Elle permet de tester un type de géométrie différent (plan), mais également d'observer et de localiser les structures profondes responsables de la déformation de surface. La silicone utilisée étant de couleur uniforme, un saupoudrage de plâtre et de sable teinté est réalisé afin de garantir une texture suffisamment riche dans l'image (Figure 3-19A). Quelques perturbations apparaissent sur les pentes des ridules formées par la silicone. Celles-ci sont sans doute liées d'une part à la faible amplitude des structures (quelques millimètres) comparativement à l'échelle d'observation (peu d'information en somme), d'autre part à un défaut de texture des ridules par rapport à leur voisinage (Figure 3-19B).

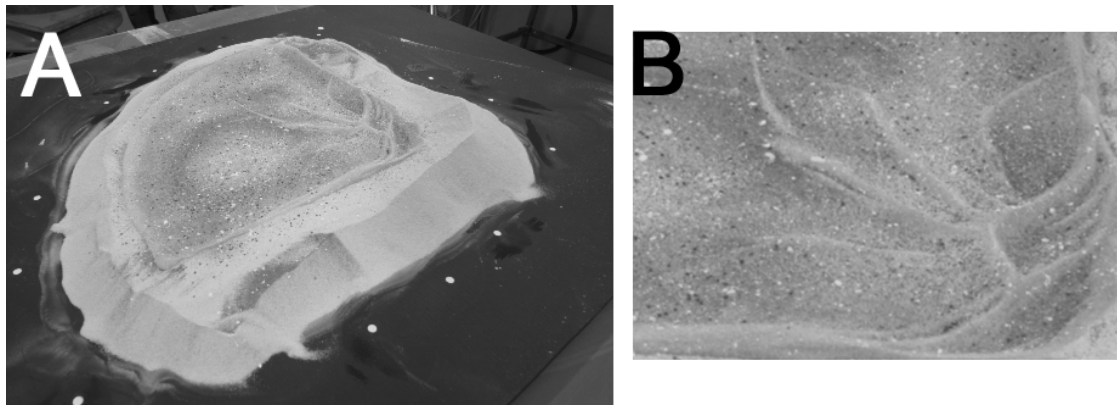


FIGURE 3-19 : EXPÉRIENCE D'ÉTALEMENT APPLIQUÉE À L'ETNA. (A) PHOTO DE LA COUCHE DE SILICONE EN FIN D'EXPÉRIENCE, INITIALEMENT SOUS LE CÔNE DE SABLE ET SON SUBSTRATUM. (B) DÉTAIL DE LA COUCHE DE SILICONE : DES RIDULES SE SONT FORMÉES. ELLES CORRESPONDENT À DES ZONES DE TEXTURE PLUS HOMOGENÈME QUE LEUR VOISINAGE.

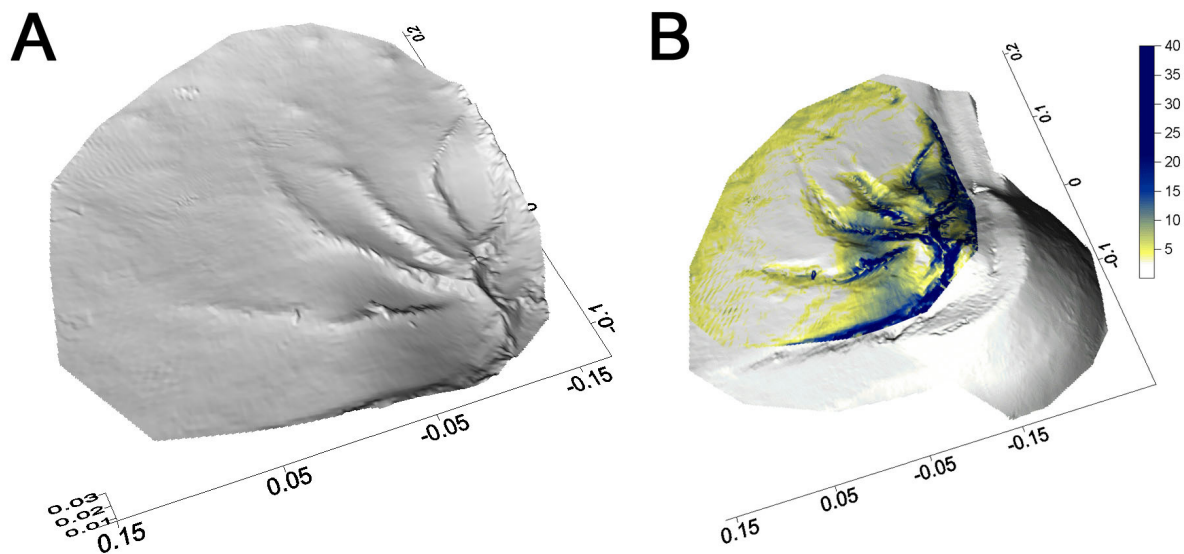


FIGURE 3-20 : (A) MNT DU SILICONE EN FIN D'EXPÉRIENCE ET (B) SUPERPOSITION DU MNT FINAL ET D'UNE IMAGE DES PENTES ISSUE DE LA RECONSTRUCTION DE LA SILICONE, PERMETTANT LA LOCALISATION DE CETTE DERNIÈRE.

3.4 DÉFORMATION D'UN ÉDIFICE EN RÉGIME EXTENSIF SIMPLE

Un dernier type d'expériences est utilisé pour tester la reconstruction 3D : il s'agit d'une modélisation analogique sur le comportement d'un édifice volcanique affecté par la présence de failles dans le substratum. La tectonique régionale joue en effet un rôle important dans la stabilité d'un volcan, et la compréhension des interactions entre un édifice et les structures tectoniques voisines est extrêmement importante pour une prévention efficace des risques d'effondrements catastrophiques. Les travaux de Wooller et al. (Wooller et al., 2003), utilisés dans cette thèse, visent à étudier plus

particulièrement l'influence de failles dans le substratum sur un édifice, avec un accent sur la transition entre failles normales et décrochantes, ainsi que sur la position relative de l'édifice et des failles du substratum.

Trois expériences différentes ont été réalisées (Tableau 3-2) permettant d'étudier la déformation dans le cas d'une faille normale excentrée (Exp. 45), d'une faille normale centrée (Exp. 46) et d'une faille normale et décrochante centrée (Exp. 47). La Figure 2-1 schématise le dispositif expérimental utilisé. Chaque reconstruction utilise entre 11 et 12 images (Figure 3-22). Seules une partie des résultats de reconstruction est présentée dans ce chapitre (Figure 3-23, Figure 3-24, Figure 3-25).

N° expérience	Type de faille	Position de la faille	Amplitude du mouvement de la faille (selon z et x, en m.)	Nombre d'acquisitions	Nombre de reconstructions
45	Normale	Excentrée	1 cm	7	5
46	Normale	Centrée	1 cm	6	4
47	Normale + décrochante (5° par rapport à la verticale)	Centrée	1 cm	6	5

TABLEAU 3-2 : EXPÉRIENCES DE DÉFORMATION D'UN ÉDIFICE EN RÉGIME EXTENSIF : PRINCIPAUX PARAMÈTRES ET NOMBRE DE RECONSTRUCTIONS EFFECTUÉES POUR LES TROIS EXPÉRIENCES RÉALISÉES. CHAQUE ACQUISITION N'A PAS FAIT L'OBJET D'UNE RECONSTRUCTION : SÉLECTION DE CERTAINES ACQUISITIONS SELON L'ÉVOLUTION DE LA DÉFORMATION.

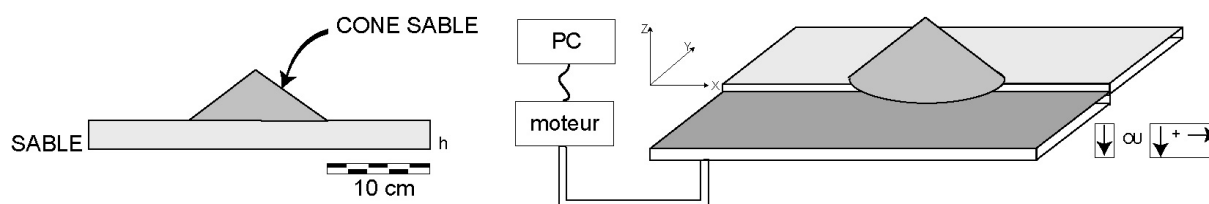


FIGURE 3-21 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL D'UNE EXPÉRIENCE DE TYPE DÉFORMATION D'UN ÉDIFICE EN RÉGIME EXTENSIF SIMPLE.

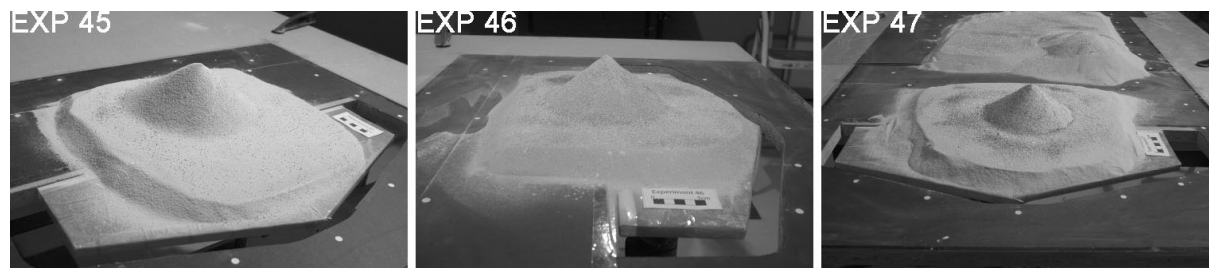


FIGURE 3-22: EXEMPLE DE VUES POUR CHACUNE DES TROIS EXPÉRIENCES SUR LA DÉFORMATION D'UN ÉDIFICE EN RÉGIME EXTENSIF SIMPLE.

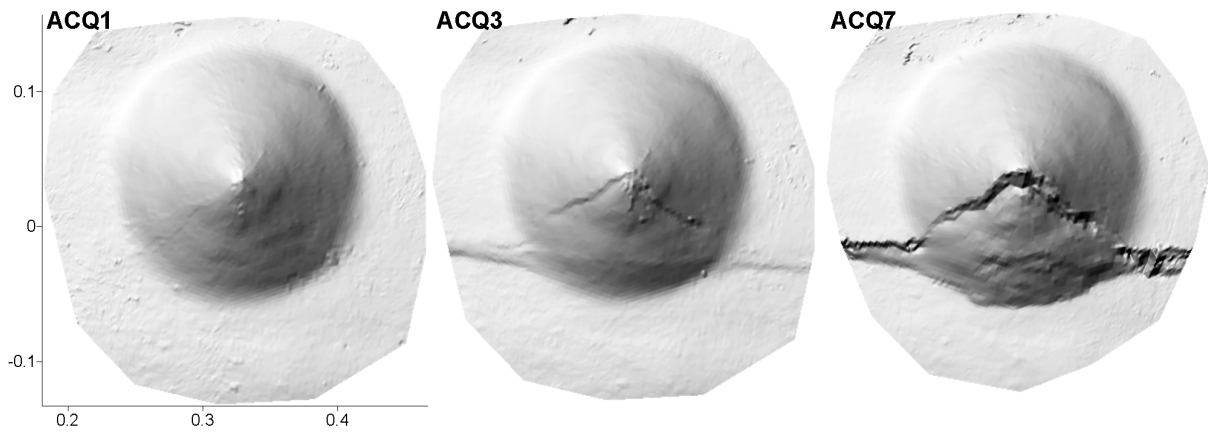


FIGURE 3-23: 3 RECONSTRUCTIONS (PARMI 5) DE L'EXPÉRIENCE 45 ISSUES DES ACQUISITIONS 1 (T=0'), 3 (T=6') ET 7 (T=22'). LE MOUVEMENT DE LA FAILLE EST NORMAL.

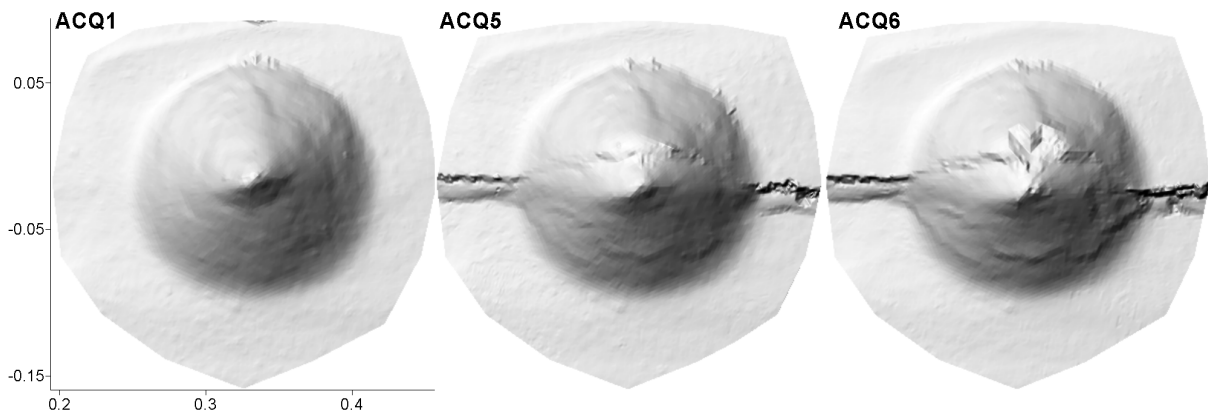


FIGURE 3-24: 3 RECONSTRUCTIONS DE L'EXPÉRIENCE 46 CORRESPONDANT AUX ACQUISITIONS 1 (T=0'), 5 (T=18') ET 6 (T=24'). LE MOUVEMENT DE LA FAILLE EST NORMAL.

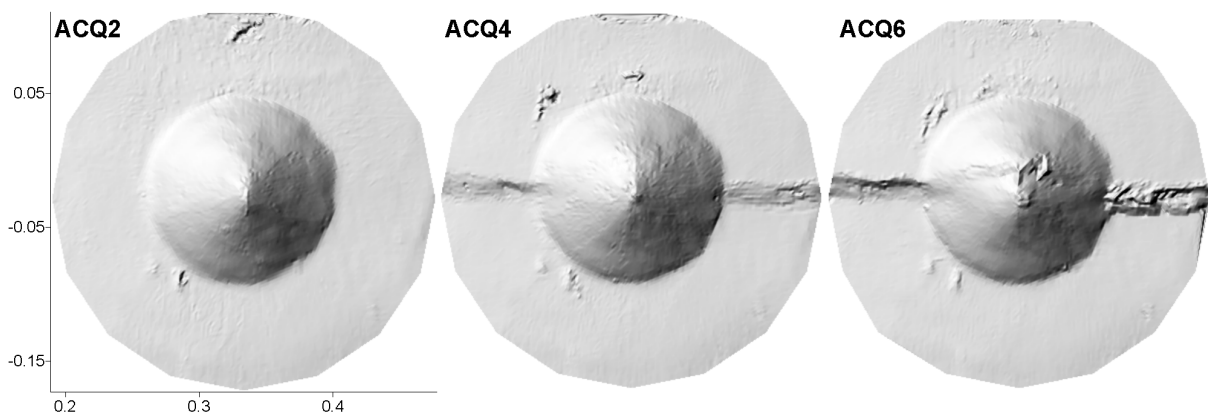


FIGURE 3-25: 3 RECONSTRUCTIONS DE L'EXPÉRIENCE 47 CORRESPONDANT AUX ACQUISITIONS 2 (T=1'), 4 (T=13') ET 6 (T=23'). LE MOUVEMENT DE LA FAILLE EST À LA FOIS NORMAL ET LÉGÈREMENT DÉCROCHANT.

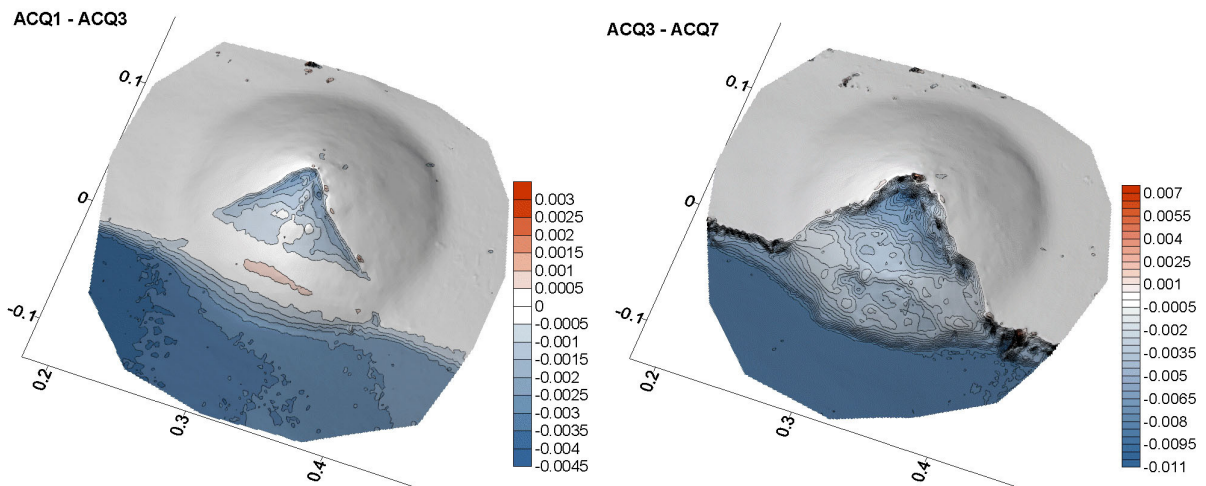


FIGURE 3-26 : EXPÉRIENCE 45. CARTES DE DÉFORMATION ENTRE LES ACQUISITIONS 1-3 (A), ET 3-7 (B) SUPERPOSÉES AUX MNT DES ACQUISITIONS 3 ET 7. CHAQUE NIVEAU REPRÉSENTE 1 MM POUR (A) ET 0.5 MM POUR (B).

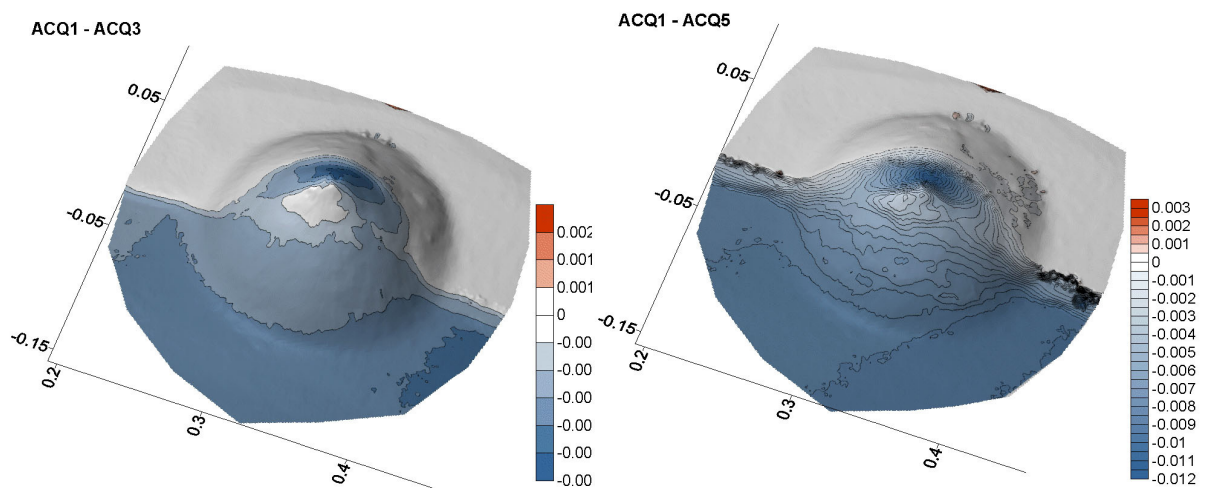


FIGURE 3-27 : EXPÉRIENCE 46. CARTES DE DÉFORMATION ENTRE LES ACQUISITIONS 1-3 (A), ET 1-5 (B) SUPERPOSÉES AUX MNT DES ACQUISITIONS 3 ET 5. CHAQUE NIVEAU REPRÉSENTE 0.5 MM. LA CARTE (A) ILLUSTRE L'APPARITION PRÉCOCE DU CHEVAUCHEMENT SUR LE FLANC DU CÔNE. LA CARTE DE DÉFORMATION ENTRE LES ACQUISITIONS 5-6 N'EST PAS PRÉSENTÉE CAR LA RECONSTRUCTION 6 EST PERTURBÉE ET AUCUNE NOUVELLE STRUCTURE DE DÉFORMATION N'APPARAÎT.

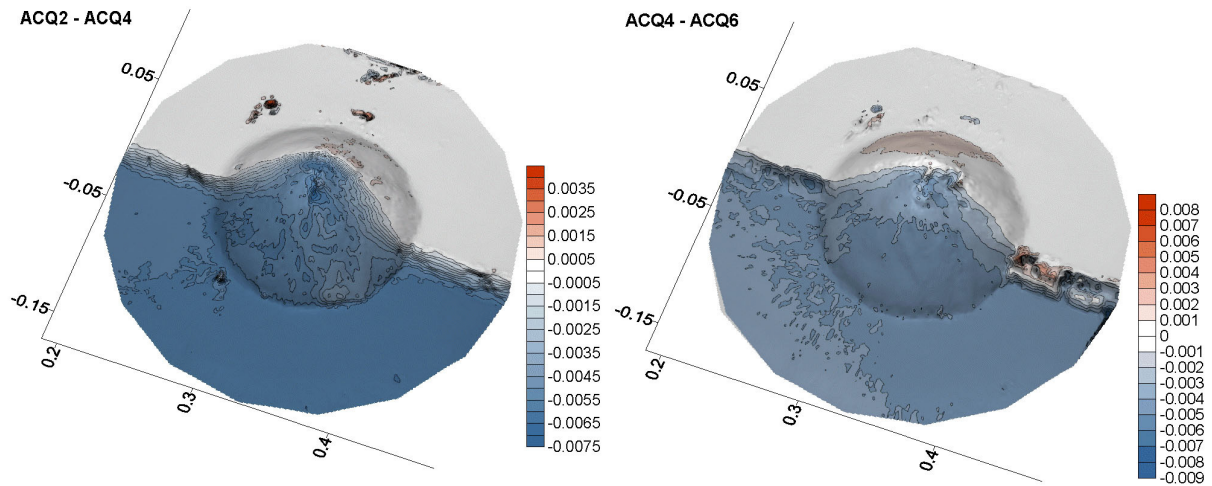


FIGURE 3-28 : EXPÉRIENCE 47. CARTES DE DÉFORMATION ENTRE LES ACQUISITIONS 2-4 (A), ET 4-6 (B) SUPERPOSÉES AUX MNT DES ACQUISITIONS 4 ET 6. CHAQUE NIVEAU REPRÉSENTE 0.5 MM POUR (A) ET 1 MM POUR (B).

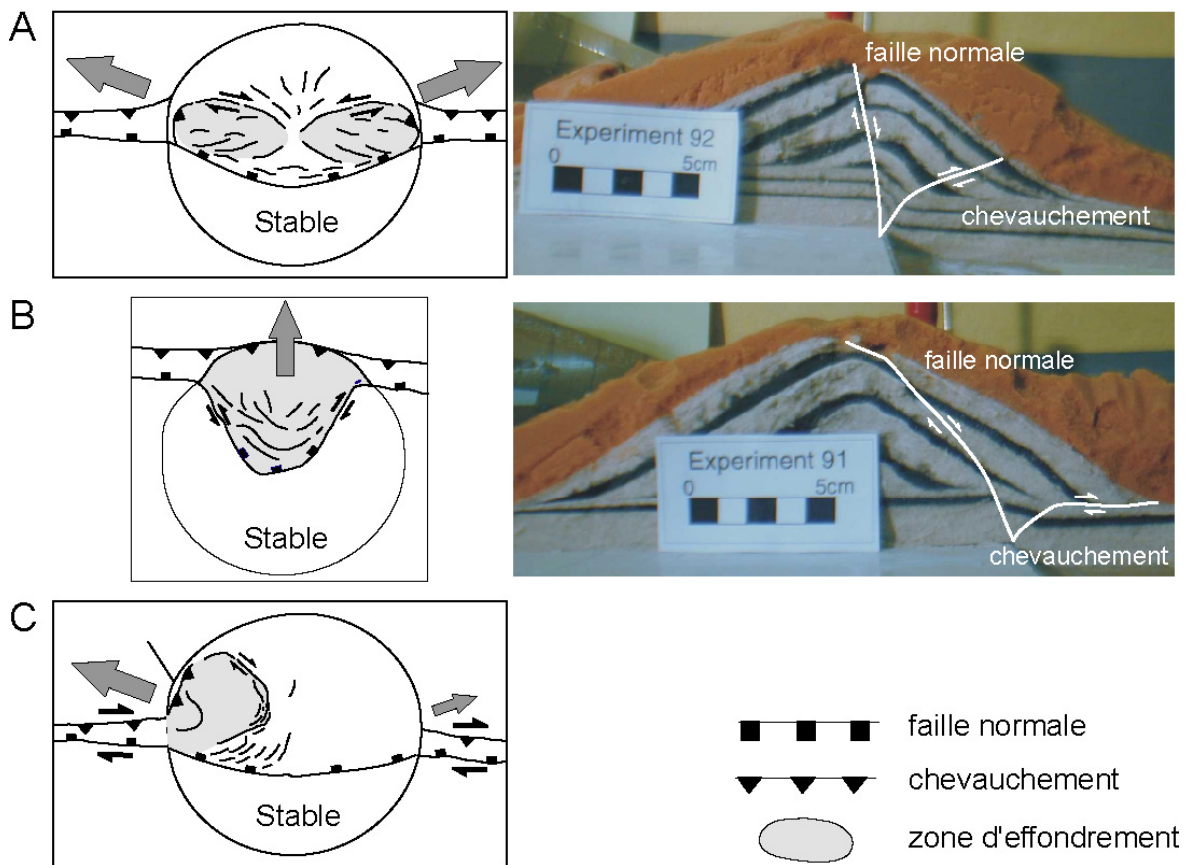


FIGURE 3-29 : PHOTOS DE COUPES DE MODÈLES (EXPÉRIENCE TYPE 46 ET 45) ET SCHÉMAS EXPLICATIFS DES STRUCTURES DE DÉFORMATION. A : EXPÉRIENCE DE TYPE EXP.46 : FAILLE NORMALE CENTRÉE. B : EXPÉRIENCE DE TYPE EXP.45 : FAILLE NORMALE EXCENTRÉE. C : EXPÉRIENCE DE TYPE EXP.47 : FAILLE NORMALE DÉCROCHANTE CENTRÉE.

Structures observées

Les structures de déformation que l'on observe sont les suivantes :

- Malgré un mouvement purement vertical pour les expériences 45 et 46, la faille normale du substratum se propage dans le cône selon un pendage non vertical. Celui-ci est d'autant plus grand que la faille est excentrée par rapport au centre du cône (Figure 3-29A et B).
- Des chevauchements apparaissent sur le flanc déformé du cône dans les expériences à mouvement purement vertical (45 et 46). Ceux-ci sont clairement visibles sur les MNT. Ils sont également mis en évidence par les cartes déformation (Figure 3-26 et Figure 3-27) : une zone ou plusieurs zones de bombement apparaissent sur le flanc déformé, caractérisées par une variation en Z négative faible par rapport au mouvement global, ou par une variation positive. Des effondrements peuvent se produire au niveau du bombement, comme c'est le cas à la fin de l'expérience 45. Failles normales et chevauchements sont formés simultanément. La coupe et le schéma de la Figure 3-29 illustrent ce qui se produit en profondeur.
- On remarque que les structures observées sur le cône sont du même type que celles observées au niveau de la fracture dans le substratum : failles normales et chevauchements (Figure 3-29).
- Dans l'expérience 47, aucun chevauchement marqué n'apparaît, si ce n'est une zone où le mouvement en Z (négatif) est moins prononcé à la base SO du cône, soit à l'opposé du mouvement décrochant (Figure 3-28). La subsidence du bloc délimité par la faille est relativement homogène.

Interprétation des résultats

En résumé, les résultats de reconstruction confirment les conclusions de Wooller et al. (Wooller et al., 2003) : une faille normale dans le substratum entraîne une instabilité du volcan avec une possibilité d'effondrements sur le flanc en mouvement, parallèlement au plan de glissement de la faille lorsque celle-ci est centrée sous le cône, et perpendiculairement à la faille quand celle-ci est excentrée (Figure 3-29A et B). La position de la faille relativement à l'édifice conditionne en effet les structures de déformation développées sur le cône, et par conséquent l'extension et la position des zones instables développées, dont la connaissance peut s'avérer intéressante pour l'évaluation des volumes d'effondrements potentiels. Lorsqu'un mouvement décrochant existe, même faible, le potentiel d'effondrement est plus important dans la direction opposée au mouvement (Figure 3-29C). La quantification précise de la surface et du mouvement permet de visualiser simplement et de confirmer la présence de chevauchements sur le flanc déformé du cône, ce dès le début de la déformation.

Conclusions sur la reconstruction 3D des modèles

Concernant la qualité des reconstructions obtenues, elle est globalement satisfaisante (Figure 3-30), cependant, on remarque la présence de perturbations à deux niveaux :

- De petits pics peuvent apparaître sur le substratum de manière localisée (Figure 3-23 et Figure 3-25) ou plus diffuse (Figure 3-23), et correspondent à des zones où la mise en correspondance s'est mal effectuée en raison d'un manque de texture dans les images, lié à

l'éclairage (perturbations variant d'une acquisition à l'autre) ou à la texture du modèle (perturbations se retrouvant d'une acquisition à l'autre).

- Des perturbations apparaissent au niveau des fractures du substratum et du cône quand la déformation est importante (Figure 3-31). Ces perturbations se retrouvent dans les trois expériences et sont particulièrement importantes dans les expériences 46 et 47 (Figure 3-24 et Figure 3-25). Deux principales explications sont possibles : (1) tout d'abord, la distance de prise de vues est trop importante, notamment pour les expériences 46 et 47 (Figure 3-22). (2) une ambiguïté propre à la méthode de reconstruction peut intervenir : en effet, les figures posant problème sont quasi-verticales, or les paramètres optimisés sont les coordonnées Z du modèle. Malgré une configuration géométrique des vues appropriée (vues latérales) pour ce type de structures, le déplacement des points du modèle selon Z n'est peut-être pas optimal : on peut imaginer qu'un déplacement des points selon X ou Y serait plus efficace dans le cas de structures verticales.

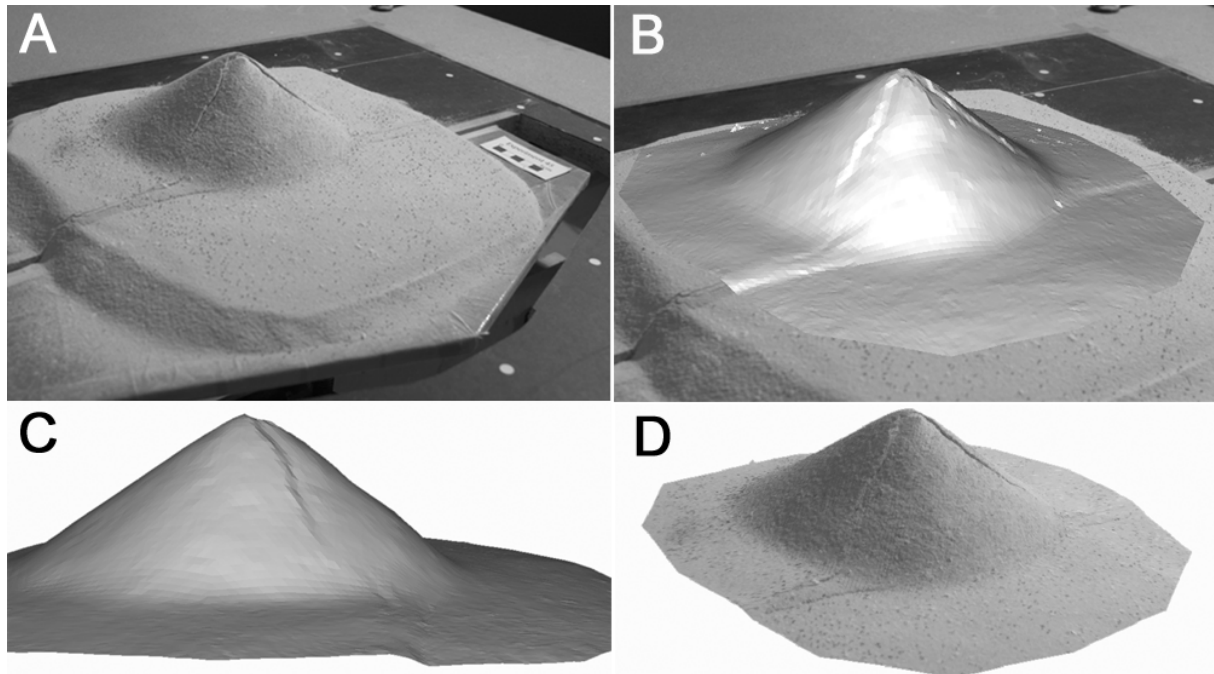


FIGURE 3-30 : EXPÉRIENCE 45 : ZOOM SUR LA RECONSTRUCTION CORRESPONDANT À L'ACQUISITION 3 (FAIBLE DÉFORMATION). (A) UNE VUE DE L'ACQUISITION 3. (B) RECONSTRUCTION SUPERPOSÉE À L'IMAGE. (C) PROFIL DE MODÈLE RECONSTRUIT. (D) MODÈLE 3D ET LA TEXTURE RÉELLE PROJÉTÉE.

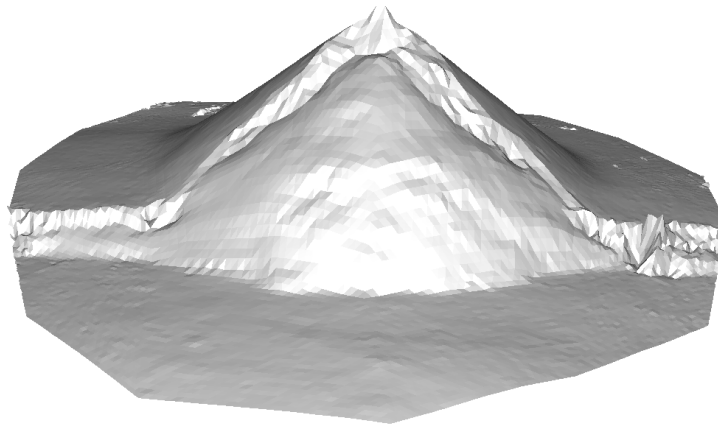


FIGURE 3-31 : EXPÉRIENCE 45 : ZOOM SUR LA RECONSTRUCTION ET LES PERTURBATIONS AU NIVEAU DES FAILLES. IMAGE DU MODÈLE RECONSTRUIT EN FIN DE DÉFORMATION (ACQUISITION 7).

3.5 BILAN DES RECONSTRUCTIONS EN LABORATOIRE ET PERSPECTIVES.

Les résultats de reconstruction 3D présentés dans ce chapitre permettent de préciser quelles sont les conditions nécessaires au bon fonctionnement de la méthode en laboratoire, et mettent en évidence ses limites.

3.5.1 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

- Diverses configurations géométriques ont été testées à travers les expériences analogiques réalisées. Loin de couvrir toutes les situations rencontrées en modélisation analogique, il est cependant possible de conclure que la méthode présente un champ d'application relativement vaste en volcanologie expérimentale. En effet, la géométrie des modèles étudiés se rencontre fréquemment en domaine volcanique : plans et formes coniques peuvent représenter des nombreuses figures réelles telles que des édifices volcaniques, des caldeiras, des cratères, des dômes de lave, des vallées et des escarpements.

Une forme initiale unique, un cône, permet, grâce à une déformation manuelle rapide du maillage (outil interactif intégré au logiciel), de s'adapter rapidement aux diverses formes citées, et constitue dans un premier temps, une initialisation suffisante pour la reconstruction.

Dans l'avenir, l'établissement d'une bibliothèque de formes initiales diverses serait intéressant pour à la fois élargir un peu plus le champ d'application de la méthode à des configurations géométriques plus complexes, et accélérer la procédure d'initialisation (automatisation plus grande).

Le maillage du modèle 3D peut être irrégulier d'après l'initialisation effectuée. A l'origine, le choix d'un maillage régulier avait été réalisé selon un souci de simplicité d'implémentation, et dans l'optique de

réaliser des comparaisons immédiates de MNT successifs. Or, en pratique, nous avons été amenés à abandonner la régularité du maillage pour s'adapter simplement aux diverses configurations géométriques des expériences en laboratoire et pour augmenter la souplesse du code (déplacement du sommet du modèle dans les trois directions de l'espace). Cette irrégularité soulève la question de l'utilisation d'un maillage adaptatif. On peut en effet envisager que le modèle ne soit pas subdivisé de manière uniforme, mais que seules les facettes où par exemple la mise en correspondance n'est pas satisfaisante fasse l'objet d'une subdivision. Cette stratégie aurait pour principal avantage d'optimiser un modèle 3D complet en concentrant l'effort de reconstruction sur les zones complexes de la surface. Du point de vue de l'optimisation, cela se traduirait par un allègement de la structure à optimiser lorsque la résolution du modèle augmente. Ainsi, l'optimisation basée sur le critère TRG (paragraphe 2.3.3.2 chapitre 2) pourrait être utilisée pour des résolutions supérieures à 4 (limite actuelle), car le nombre d'inconnus et de mesures serait moins grand. Un maillage adaptatif pour le modèle 3D constitue donc une piste pour l'amélioration de la méthode de reconstruction. Des exemples de méthodes de reconstruction 3D utilisant des stratégies de maillage adaptatif peuvent être trouvés dans la littérature (Delingette, 1997). Une mise en garde est cependant à faire : l'irrégularité du maillage entraîne une hétérogénéité de la densité d'information présentée par la reconstruction 3D finale. Ceci peut constituer un inconvénient, notamment dans l'état actuel de la méthode où l'irrégularité du maillage provient d'une adaptation grossière du modèle initial à la surface et non d'une stratégie plus fine d'adaptation lors de l'optimisation. En effet, soit deux zones du modèle de surface identique, l'une d'elle étant représentée par un maillage plus grossier. Les deux zones peuvent être d'un intérêt équivalent d'un point de vue géologique, c'est à dire nécessiter une densité d'information 3D équivalente, alors que la résolution finale sera différente en raison du maillage irrégulier. Les expériences réalisées ont de plus montré un possible lien entre l'irrégularité du maillage et une dégradation de la qualité de la reconstruction (voir les expériences d'étalement du paragraphe 3.3.1). Une étude plus détaillée sur le lien entre irrégularité du maillage et précision de reconstruction serait alors nécessaire avant d'entreprendre le développement d'un maillage adaptatif par exemple.

- Les dimensions des différents modèles étudiés sont du même ordre de grandeur : décimétrique. L'échelle d'observation ne varie donc guère d'une expérience à l'autre. Cette échelle d'observation est la plus courante en modélisation analogique, et peut être obtenue si nécessaire par une adaptation du dimensionnement des expériences. La précision de la reconstruction 3D est liée à cette échelle d'observation et doit être prise en compte dans l'interprétation des données. Rappelons que les tests de précision effectués sur des modèles de géométrie connue (paragraphe 2.5 chapitre 2) donnent des valeurs de l'ordre de 10^{-4} m à 10^{-5} m pour une distance d'observation de 0.5 m. Un simple rapport d'échelle permet d'avoir une idée de la précision de reconstruction possible en ce qui concerne une expérience donnée.

- Une texture riche dans l'image est une condition indispensable au bon fonctionnement de la méthode de reconstruction. Cette texture image est conditionnée par (1) les paramètres de prise de vues et l'éclairage du modèle, mais également par (2) la texture physique et la composition du modèle

analogique. En laboratoire, les paramètres de prise de vues et l'éclairage peuvent être ajustés facilement de manière à obtenir des vues de qualité. En ce qui concerne la texture du modèle analogique, les matériaux analogues utilisés permettent d'acquérir une texture suffisamment riche. En fin de construction d'un modèle, un saupoudrage de particules diverses (sable coloré, grains de carbure de silicium, bois teint, plâtre) est en général réalisé pour être garanti de la qualité de la texture. Ceci ne constitue pas une véritable contrainte dans l'application de la méthode de reconstruction en laboratoire. On a également pu observer dans les diverses expériences réalisées qu'une texture « double » était préférable pour éviter des perturbations dans la reconstruction 3D : une micro et une macro texture aident à la mise en correspondance. La micro texture assure la variabilité haute fréquence du signal dans l'image, alors que la macro texture constitue des sortes d'accidents dans la régularité de la micro texture et constituent des « repères » pour la corrélation dans les images. La texture du modèle doit aussi être adaptée à la distance d'observation. Considérons par exemple un cône constitué de sable, sans adjonction d'autres particules à sa surface. Si le grain de sable est inférieur au pixel pour une distance d'observation X , alors on se retrouve dans un cas limite où la surface du modèle apparaîtra relativement homogène dans l'image.

- Selon les protocoles expérimentaux, le modèle analogique ne peut pas toujours reposer sur la mire d'étalonnage. Cependant cela ne constitue pas de véritable problème pour le calibrage du capteur qui peut être effectué selon les deux manières présentées au paragraphe 2.2.2.3 du chapitre 2.
- Enfin, toujours selon les protocoles expérimentaux, la déformation d'un modèle peut être rapide. Or il est nécessaire que le modèle soit statique ou considéré comme tel lors de l'acquisition d'une série de vues. Cela constitue donc une limite de la méthode de reconstruction. Cette contrainte sur la rapidité de prise de vues est pourtant gérée correctement dans les expériences réalisées, malgré une déformation relativement rapide dans certains cas (expériences sur la déformation gravitaire des volcans au cœur altéré, paragraphe 3.2).

3.5.2 LE CAPTEUR UTILISÉ

Le seul capteur utilisé dans les diverses expériences présentées est le Nikon D1 (paragraphe 2.2.3 du chapitre 2). La qualité de la reconstruction est principalement liée à la qualité de l'optique utilisée, à la résolution du capteur et sa sensibilité (son rapport signal/bruit). Il serait intéressant de tester la méthode de reconstruction sur des images prises par d'autres capteurs et de comparer les reconstructions. Cela permettrait de valider la souplesse de la méthode quant à l'utilisation d'autres capteurs. Il est néanmoins de bon sens d'utiliser des capteurs de qualité si la précision de reconstruction requise est l'un des objectifs principaux. On peut noter qu'en laboratoire, des capteurs de type caméra numérique IEEE 1394 monochrome haute résolution pourraient convenir au type d'application envisagée. Ces derniers sont fréquemment utilisés en vision industrielle et sont moins

chers que l'appareil photo utilisé dans nos expériences, dont le choix a été en partie guidé par les perspectives d'utilisation du capteur sur le terrain.

- La précision de la reconstruction est également étroitement liée au calibrage du capteur. Selon nous, le calibrage précis est nécessaire lors de chaque expérience. Cela permet non seulement d'utiliser le capteur de son choix, mais surtout de connaître très précisément les paramètres du capteur pour chaque application, fournissant ainsi des conditions optimales pour la reconstruction. En effet, l'optimisation du modèle fait intervenir les équations de projection dans l'image, et une incertitude sur les paramètres de ces équations se répercute directement sur la précision de reconstruction 3D. Dans les expériences réalisées, le même capteur a été utilisé, avec deux objectifs différents (18 et 28 mm). On observe que sur 14 expériences réalisées (28 mm), la variation maximale sur la focale et le point principal est de l'ordre de 3%. Les changements de mise au point entre les différentes expériences constituent la principale explication à ces variations. Ces variations sont importantes pour l'application visée (recherche d'une précision de reconstruction maximale) et un calibrage précis pour chaque expérience, possible grâce à la méthode de calibrage utilisée, se justifie. Il serait néanmoins intéressant de quantifier dans l'avenir l'influence d'une erreur initiale des paramètres du capteur (internes et externes) sur la précision de reconstruction. Si cette influence se révèle être moins importante qu'initialement supposée, alors on peut envisager (1) de se servir de la reconstruction pour affiner les paramètres de la caméra, (2) de réduire le calibrage initial au calcul de pose (ainsi que la géométrie de la mire) lorsqu'un même dispositif d'acquisition (capteur et objectif) est utilisé pour différentes expériences : les paramètres internes peuvent être calculés une seule fois et réinjectés ensuite dans une version de calibrage « allégée », bien que ceci ne constitue guère un gain de temps, (3) d'explorer d'autres possibilités de calibrage moins précis mais plus souple pour une application sur le terrain par exemple (méthodes d'autocalibrage).

3.5.3 CONFIGURATION DES VUES

- Le mode d'acquisition des vues selon deux couronnes, comme décrit au paragraphe 2.1.3 chapitre 2, permet l'obtention de résultats de reconstruction satisfaisants. Les contraintes à respecter concernant l'acquisition des vues sont les suivantes : (1) une même zone doit être couverte par au moins deux images espacées de moins de 60°, (2) le modèle doit être entièrement couvert de cette manière pour une reconstruction complète. On peut remarquer qu'il est néanmoins possible de ne reconstruire qu'une partie du modèle si celui-ci n'est que partiellement photographié. En général, le mode d'acquisition et le nombre de vues proposé permettent de répondre correctement à ces contraintes, nécessaires pour un bon fonctionnement de la reconstruction ; une couronne « basse » de 8 vues et une couronne « haute » de 4 vues sont suffisantes si celles-ci sont prises régulièrement espacées. Cependant, l'expérience a montré qu'il était préférable de prendre un peu plus de vues pour chaque couronne afin de s'assurer que les contraintes soient bien respectées. En effet, la prise

de vue à main levée peut facilement conduire à de mauvaises configurations géométriques des images (irrégularité de la prise de vue selon une couronne ou vues trop espacées entre deux couronnes).

- On peut également conclure que le nombre de vues doit s'adapter à la complexité du modèle à reconstruire. En effet, plus les structures du modèle sont complexes, plus l'information les concernant doit être importante. Ainsi, pour un modèle se déformant, il est judicieux d'acquérir plus de vues en fin de déformation qu'au début (exemple de l'expérience sur l'étalement gravitaire appliqué à l'Etna, paragraphe 3.3.2). De la même façon, il est souhaitable de tenir compte de la géométrie initiale du modèle lors de l'acquisition des vues. Si par exemple le modèle présente une surface horizontale importante (exemple d'un modèle composé d'un cône et d'un plan), il faudra augmenter le nombre de vues de la couronne haute.

- Enfin, il est nécessaire de s'assurer que le modèle couvre au maximum le champ du capteur afin d'optimiser la quantité d'information disponible pour la reconstruction 3D.

- En dernier lieu, le problème des perturbations de reconstruction rencontré au niveau des figures verticales semble avoir deux principales origines, dont l'une est liée à la configuration des vues : l'information disponible est insuffisante pour la réalisation d'une reconstruction correcte, ceci en raison d'une insuffisance du nombre de vues et d'une distance d'acquisition trop importante. Dans ce cas, l'augmentation du nombre de vues devrait en partie résoudre le problème. Une autre raison à ces perturbations pourrait provenir du choix des paramètres d'optimisation, peut-être non optimal pour des figures verticales. En effet, il se peut qu'il y ait une instabilité liée la reconstruction de surfaces verticales par la déformation de points selon l'axe Z. Il serait alors intéressant de tester l'influence de ce choix de la paramétrisation sur la qualité de la reconstruction, mais également d'évaluer son influence comparativement à l'influence du nombre de vues.

3.5.4 SUIVI DE LA DÉFORMATION

Un aspect extrêmement important de la modélisation analogique est le suivi de la déformation. On a vu, dans les expériences présentées au sein de ce chapitre, que la réalisation de reconstructions successives permet de suivre l'évolution du modèle selon Z. La précision atteinte par les reconstructions 3D permet de détecter de manière fiable des mouvements extrêmement faibles, constituant une information précieuse quant à la compréhension et l'interprétation des résultats. Il est d'ailleurs possible, par un raisonnement inverse, de se servir de l'amplitude des mouvements détectés pour avoir une indication sur la précision de reconstruction. Le suivi de la déformation selon Z est cependant souvent insuffisant pour les expériences réalisées, et une information plus complète sur la déformation dans les trois directions de l'espace serait souhaitable. Dans cette optique, le développement et l'intégration à la méthode de reconstruction d'un outil automatique de suivi dense de la texture (« tracking » en anglais) dans des images prises à des temps différents constitueraient une suite logique de ce travail de thèse. Des travaux de ce type se retrouvent dans la littérature (Garcia, 2001). Dans l'état actuel de la méthode, il est possible d'extraire quelques données de

déformation 3D à partir de suivi manuel de points dans les images, comme cela fut le cas pour une des expériences sur la déformation des volcans au cœur altéré (paragraphe 3.2). Cependant le travail peut être fastidieux et la densité d'informations obtenues est faible, quoique parfois suffisante pour la compréhension d'un phénomène. Une corrélation dense ou semi-dense entre images spatialement proches mais prises à des temps différents seraient nécessaire. Il est en effet essentiel d'utiliser les données ayant initialement servi à la reconstruction 3D pour ne pas alourdir la méthode (ne pas envisager de prendre des images d'un même point de vue par exemple). Ce travail représente donc une des perspectives de développement futur de la méthode.

3.5.5 CONCLUSIONS

En conclusion, la reconstruction de modèles analogiques en laboratoire et la quantification de leur déformation constituent des outils d'analyse puissants permettant l'étude de nombreux phénomènes en volcanologie. La reconstruction 3D permet de compléter les observations visuelles traditionnelles et permet une analyse fine de la déformation dans le temps, parfois impossible à réaliser autrement en raison de la faible amplitude des mouvements observés. Elle autorise également un rendu visuel intéressant pour la compréhension de la déformation et de son évolution. La méthode de reconstruction 3D proposée, spécifique à ce type d'application, est validée par les résultats présentés, où divers protocoles expérimentaux sont testés. Si un certain nombre de conditions expérimentales sont respectées, une reconstruction 3D complète est possible jusqu'à une précision de l'ordre du dixième de mm, voire moins (Chapitre 2 paragraphe 2.5), pour une distance de prise de vue de 1 m. Ces conditions particulières sont un éclairage adapté, un modèle d'étude texturé, un capteur de bonne qualité (optique, sensibilité et résolution), une couverture complète du modèle par les différentes vues devant assurer qu'une même zone du modèle soit visible dans au moins deux images espacées de moins de 60°. Pour un résultat optimal, il faut également prendre des vues de manière à couvrir au maximum le champ du capteur. Dans des conditions similaires aux expériences présentées, le nombre de vues minimum conseillé est de 12, sachant que l'utilisation d'un grand nombre de vues est tout à fait possible, et ne pénalise pas la méthode de reconstruction d'un point de vue temps de calcul. En effet, chaque facette du modèle 3D est mise en correspondance dans un nombre d'images donné, indépendant du nombre d'images total autour de l'objet. Le suivi de la déformation en Z par différence des reconstructions 3D successives est quasi-immédiat et fournit des informations précieuses sur le phénomène étudié, permettant notamment la détection de mouvement infra-millimétrique impossible à l'œil nu. Pour être complet, il serait intéressant d'intégrer à la technique proposée un outil de « tracking » de la texture qui permettrait alors d'avoir une information de déformation dans les trois directions de l'espace. Des améliorations concernant différents aspects du code peuvent également être envisagées, notamment en ce qui concerne l'initialisation du cône, le temps de calcul ou l'élimination automatique de mesures erronées. Cette méthode de reconstruction 3D ouvre des perspectives de quantification simple et rapide en laboratoire, et peut rivaliser avec des

méthodes de reconstruction par corrélation dense, plus classiquement employée à l'échelle du laboratoire.

4 APPLICATION AUX SURFACES VOLCANIQUES RÉELLES

4.1 INTRODUCTION

La méthode de reconstruction 3D multi-vues a été développée et testée en laboratoire. Ce travail constitue la majeure partie de la thèse. Les résultats obtenus nous ont également encouragé à nous intéresser à son application aux surfaces volcaniques réelles. En effet, l'utilisation d'une telle méthode est, on l'a vu, extrêmement attirante pour le volcanologue, notamment dans le cadre de la surveillance d'un édifice volcanique (chapitre 1, paragraphe 1.1.2). Elle permettrait de répondre aux exigences particulières de la reconstruction 3D en volcanologie, ce qui n'est pas toujours le cas avec les méthodes de réalisation de MNT actuelles. La combinaison des principaux avantages attendus de la reconstruction multi-vues, c'est-à-dire la souplesse et la flexibilité de mise en œuvre de la méthode, la haute précision de la reconstruction, la gestion de surfaces de géométrie complexe et le coût financier raisonnable, constitue un réel attrait des chercheurs pour la méthode.

Cependant le passage du laboratoire au terrain ne semble pas immédiat. La méthode de reconstruction a été développée dans les conditions idéales de laboratoire où il est possible de contrôler l'éclairage de la scène à reconstruire, la prise de vues, la couverture et la texture de l'objet. Les expériences peuvent être reproduites, et ainsi permettre par exemple de corriger rapidement une mauvaise acquisition des vues. Le calibrage du capteur est également simple et rapide. Ces conditions idéales ne sont plus assurées sur le terrain et un certain nombre de difficultés sont attendues quant à la transition laboratoire / terrain. Cette transition correspond en quelque sorte à une généralisation de l'application de la méthode : les surfaces volcaniques réelles (morphologie, texture) et leur environnement présentent évidemment une bien plus grande variabilité que ce qui peut être rencontré en laboratoire, dans le cadre de la modélisation analogique.

Les difficultés attendues sont les suivantes : la principale concerne le calibrage du capteur, plus précisément l'estimation de la géométrie extrinsèque : en laboratoire, des pastilles photo réfléchissantes détectées automatiquement de manière très précise et dont la position approximative est connue permettent le positionnement et l'orientation de l'appareil photographique. Une telle situation n'est pas envisageable sur le terrain. L'estimation des paramètres internes peut quant à elle être dissociée de l'estimation de la géométrie extrinsèque, et être effectuée à l'aide d'une mire d'étalonnage, telle qu'en laboratoire, avant ou après l'acquisition des vues, à condition que la mise au point reste la même lors des deux phases (acquisition des vues pour la reconstruction et le calibrage). D'autres difficultés liées à l'éclairage de la scène peuvent être rencontrées au niveau de la mise en correspondance : contrairement au laboratoire, des variations d'éclairage lors de l'acquisition des images peuvent se produire (rotation autour de la scène pour l'acquisition des vues, atténuation de la source lumineuse occasionnée par des nuages par exemple). Théoriquement, ces variations ne devraient toutefois pas affecter la reconstruction, car le code actuel prend en considération les variations d'éclairage de la scène par le centrage et la normalisation des mesures du critère. Des zones d'ombre d'ampleur variable liées à la position de la source lumineuse (le soleil) et à la complexité de la surface étudiée peuvent par contre perturber la mise en correspondance. Ces zones d'ombre correspondent en effet dans l'image à des zones très peu texturées qu'il sera difficile de mettre en correspondance. Une difficulté supplémentaire apparaît lorsque la zone d'ombre se modifie dans le temps, ce qui est le cas si l'acquisition des vues n'est pas assez rapide ou si l'ombre est due à un phénomène transitoire et/ou instable (exemple d'un nuage qui se déplace et se modifie).

Le changement d'échelle intervenant lors du passage du laboratoire au terrain peut influencer sur la configuration des vues. En effet, selon la précision de reconstruction visée et la surface étudiée, le nombre de vues et la distance de prise de vues devront être adaptés. La totalité de l'objet peut par exemple ne pas être contenue dans une même image. Une configuration différente des vues par rapport à celle expérimentée en laboratoire peut alors avoir des répercussions sur la reconstruction. A titre d'exemple, l'utilisation de vues très rapprochées peut nuire à une bonne triangulation.

Comment se comporte la méthode de reconstruction multi-vues lorsque nous l'appliquons au terrain ? Telle est la question à laquelle nous essayerons de répondre dans cette partie du mémoire. Il s'agit de cerner quel est le potentiel de la méthode dans le cadre d'une application de terrain en volcanologie, quelles en sont les limites et enfin quelles sont les principales adaptations à apporter au code initial.

4.2 APPLICATION AU TERRAIN : POTENTIEL DE LA TECHNIQUE

Une étude préliminaire du potentiel d'application de la méthode sur le terrain est réalisée. Cette étude se présente sous la forme d'un article publié en 2003 dans *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Dans cet article, les différents types de phénomènes volcaniques concernant la déformation et les changements de surface sont répertoriés, et le champ d'application potentiel de la méthode de reconstruction est indiqué. Le principe de la méthode et son développement en

laboratoire sont également résumés. Les dernières modifications de la méthode ne figurant pas dans l'article, le lecteur se réfèrera de préférence au chapitre 2 du présent mémoire pour une version plus complète et récente de la méthode. Deux exemples de volcans permettent d'évaluer plus concrètement les possibilités d'application de la méthode et de souligner les éventuelles difficultés liées à une application terrain de la méthode.



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Journal of volcanology
and geothermal research

Journal of Volcanology and Geothermal Research 123 (2003) 181–201

www.elsevier.com/locate/jvolgeores

N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology

E. Cecchi^{a,*}, B. van Wyk de Vries^a, J.-M. Lavest^b, A. Harris^c, M. Davies^d^a *Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, UMR 6524 du CNRS, 5, Rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand, France*^b *Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'Automatique (LASMEA), UMR 6602 du CNRS, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France*^c *HIGP/SOEST, University of Hawai'i, 2525 Correa Road, Honolulu, HI 96822, USA*^d *Arc Geophysics, Milton Keynes, UK*

Received 19 September 2001; received in revised form 6 December 2001; accepted 28 January 2002

Abstract

We present a method of reconstructing volcanic morphology using multiple digital views (*N*-view), captured at different angles around an object. This approach uses recent advances in the field of Computer Vision to provide accurate 3-D measurements of volcanic surfaces. Videogrammetry (digital image reconstruction) is used, as it is best adapted to numerical processing. The method is tested and now used in the laboratory on analogue volcanic cones. The method begins with calibrating the camera and finding image positions, using an accurate *N*-view calibration method. This is done by estimating internal and external parameters of the camera using several views of a specially constructed calibration target. The *N*-view reconstruction of the real object is then done by iteratively deforming an initial theoretical model of the surface. Laboratory tests show that reconstruction accuracy is about 10^{-4} m for a distance between the object and the camera of 0.5 m, and is potentially several orders of magnitude higher for surfaces of finer texture and using higher precision sensors. This is easily high enough to be useful for the accuracy required for morphological studies. It is also sufficient for monitoring most types of volcano deformation. The technique has the potential to detect morphology changes of the order of mm. Use of the method in the field requires a slightly different approach from that in the laboratory: textures and lighting are more variable, and the sensor and ground control point location and model calibration must be done differently. We provide case studies from laboratory tests and qualitative image analysis for two field cases: Piton de la Fournaise (Indian Ocean) and Santaguito (Guatemala). These illustrate the technique's potential and explore problems of field application. Using current sensors, the method has the potential to provide sufficient precision for fine (mm–cm) scale reconstruction, and will represent a valuable, simple and flexible tool when compared with classical stereophotogrammetry techniques.

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: videogrammetry; 3-D multi-view reconstruction; morphology; volcano deformation; volcano monitoring

* Corresponding author. Tel.: +33-4-7334-6763;
fax: +33-4-7334-6744.

E-mail addresses: cecchi@opgc.univ-bpclermont.fr
(E. Cecchi), vanwyk@opgc.univ-bpclermont.fr
(B. van Wyk de Vries), lavest@lasmea.univ-bpclermont.fr
(J.-M. Lavest).

1. Introduction

Morphology and deformation analysis of volcanoes is an essential part of volcano monitoring and hazard assessment. Many processes that con-

0377-0273/03/\$ – see front matter © 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/S0377-0273(03)00035-0

control the shape of a volcano can provide useful information on internal dynamics and can allow prediction of events, such as intrusion, eruption, and flank collapse. Among the available methods for this, 3-D reconstruction from photographs (stereophotogrammetry using stereo pairs to generate X, Y, Z data) and image analysis is a field that promises to compliment point measurements made using standard surveying techniques or GPS. Here we present a new type of image-based reconstruction based on multi-view videogrammetry, an advanced stereophotogrammetric approach. We first provide an overview of the types and scales of deformation and surface change found on volcanoes, and available methods with their fields of operation. Then we present the multi-view videogrammetry method and discuss its precision and application to morphology, deformation and volcanic hazards at volcanoes.

1.1. Morphology in volcanology

The shape of a volcano, i.e. its morphology, is one of the most obvious ways of classifying an edifice (Macdonald, 1972; Williams and McBirney, 1979; Francis, 1993; Sigurdsson et al., 2000). Morphology is one of the basics of volcanology. For example, clear differences in morphology form the basic means of classifying shield volcanoes, stratocones, cinder cones, or calderas. Furthermore, because volcanoes tend to be self-similar, and have fractal relationships (Bruno et al., 1992), the gross morphological differences are repeated at different scales. For example, at an edifice scale, an oceanic volcano can be viewed

as a broad shield cut by large faults and valleys (Fig. 1). At a smaller scale thin lava fields and eccentric cones dominate the texture. Below this, pahoehoe and aa lobes dominate within which smooth or rubbly surfaces can be identified. Finer still are the textures felt by hand: the vesicles and phenocrysts. In contrast, an arc stratovolcano is often roughly conical from a long distance. Closer up, domes and thick lava flows appear, closer still the lobes become blocky, with sharp edges. Closer still, the block surfaces are flat and flaggy (Fig. 2). Of course, these examples are gross simplifications, ignoring other deposits, the action of tectonics, erosion and sedimentation. All of these factors conspire to generate extremely complex morphologies, which reflect a characteristically volcanic environment. The study of such features requires an overall 3-D view of the volcanic form at different scales.

1.2. Ground deformation and surface change in volcanology

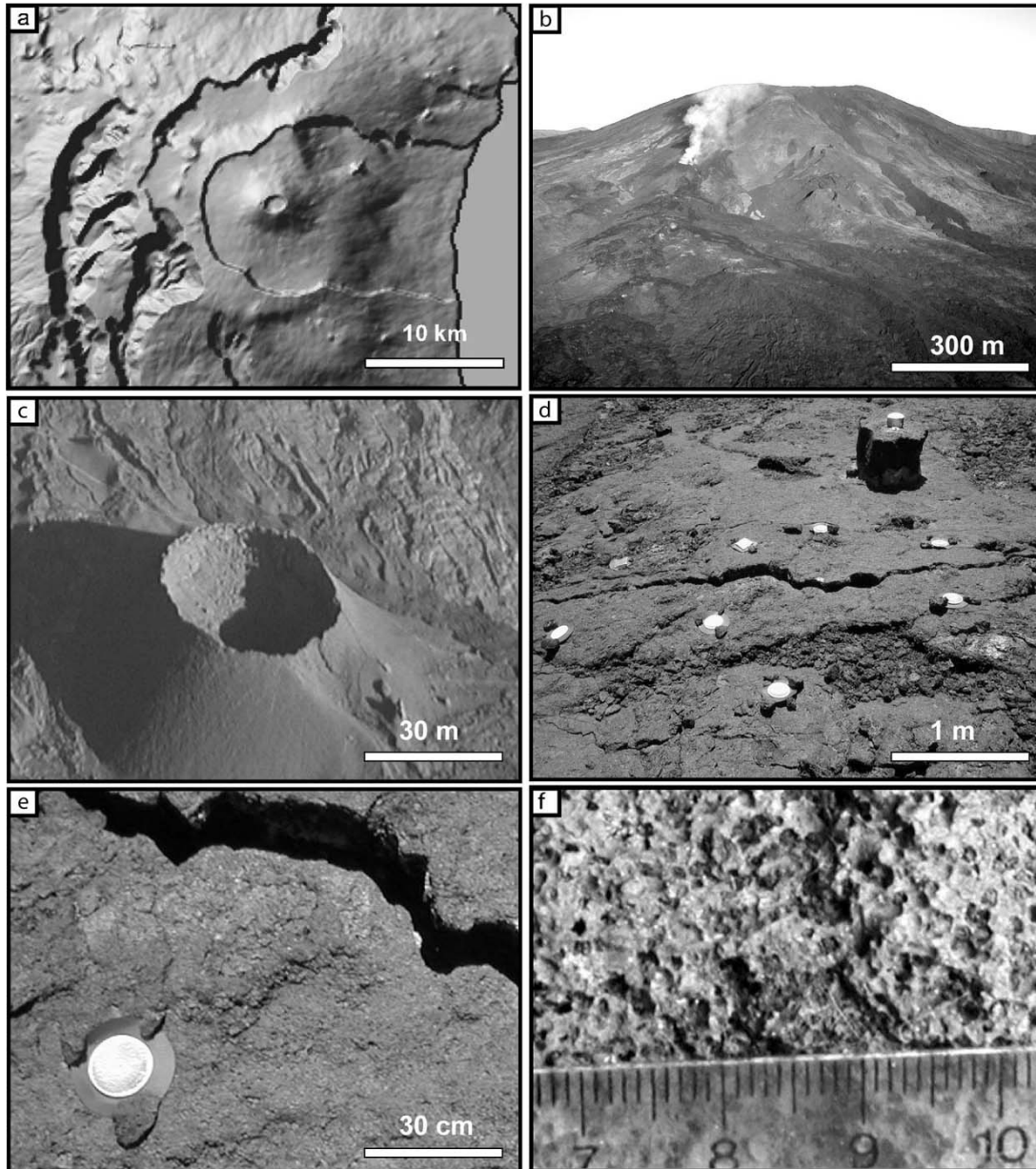
The surface of volcanoes deforms in response to magma intrusion, hydrothermal activity, regional tectonic movement and gravity related tectonic movements (Murray et al., 1994; Borgia, 1994; van Wyk de Vries et al., 2000; Donnadieu, 2000). The measurement of such deformation is one of the longest standing and most useful tools in volcano monitoring. Time scales of deformation range from milliseconds (seismic monitoring), to seconds for landslides, dyke intrusions and fault movements, to days for slow intrusions or chamber replenishment, to thousands of years for gravitational and tectonic activity. Similarly,

Fig. 1. An example of textures in volcano images at different scales, using Piton de la Fournaise, Reunion Island. (a) 1-km scale: DEM image at 250 m resolution, showing the major structural and erosive features in shaded relief. (b) 100-m scale: a numerical image taken of the central cone in the Enclos Caldera. Texture is dominated by individual lava flows, cones and pyroclastic ejecta. The main shape is the dome-like central volcano. (c) 10-m scale: Chateau Fort, a large scoria cone on the S flank of the main cone. At this scale texture is dominated by lava channels and flow features, blocks on the pyroclastic cone. Also, a recent man-made path is visible. The main shape is the scoria cone and crater and the sloping lava surface. (d) 1-m scale: fissure in lava lake surface in the Bory crater. The stone pedestal with target is used for airborne radar monitoring, each round target is 10 cm across. Texture is dominated by fracture, lava ripples and the pedestal. (e) 10-cm scale: the lava surface and fissure shown in (d). The rough surface of the lava lake crust is now the dominant texture and shape (ignoring the crack). (f) 1-cm scale: close-up view of a sample of Piton de la Fournaise lava. The main texture is vesicle, small fracture and phenocryst.

length scales of such deformation range from microns to kilometres.

Deformation on a volcano can occur in a continuous fashion, in increments, or a combination

of both. For example, swelling by elastic response around slowly expanding intrusions is normally gradual, while the fracturing around a rapidly emplaced dyke nearing the surface will probably



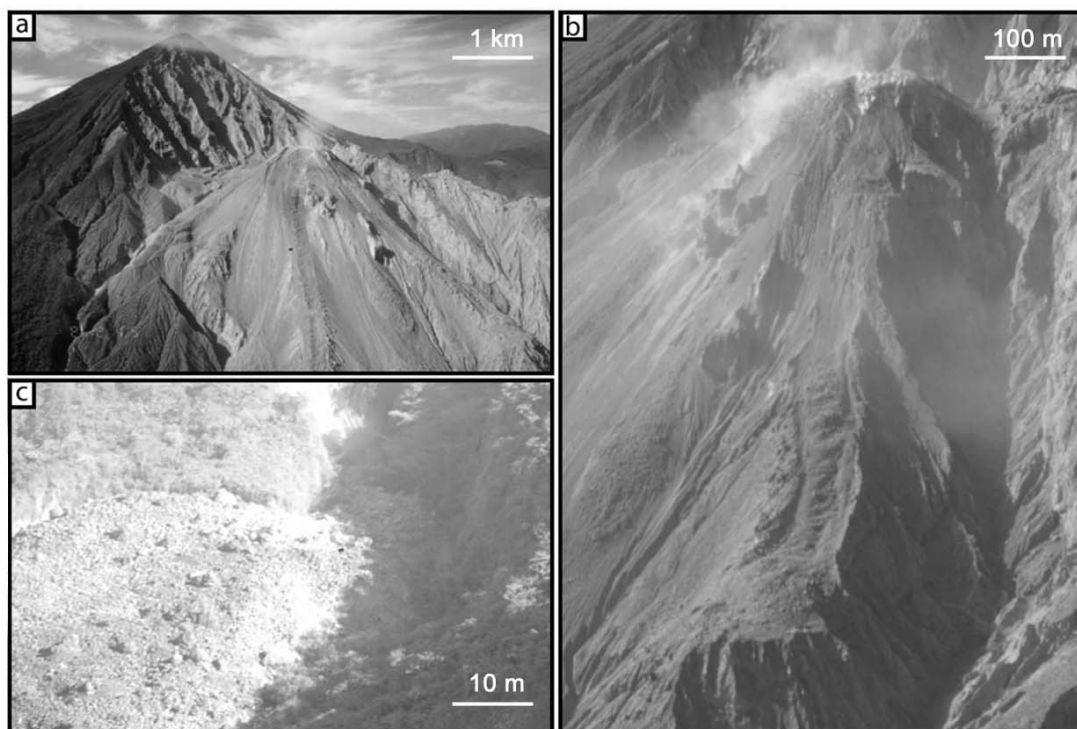


Fig. 2. An example of image texture and surface conditions on a volcano, using Santiaguito, Guatemala. The images here are digitally scanned colour ektachrome slide film. They were taken to test textural characteristics before a numerical campaign is organised. (a) The whole volcano from 5 km distance. The main peak is Santa Maria (partially destroyed in 1902) and the smaller steaming peak is Santiaguito. The shape of each is conical and is well suited to the videogrammetry method already developed on analogue cones. There are clearly several problems. The greater part of Santa Maria is dense forest, so precision for this part is limited (good for general geomorphology, bad for deformation work). Surface resolution is better in a grassy area on the lower slopes and is excellent on the active dome. Some areas of the dome are blank scree slopes. Visibility is limited by slight cloud cover over Santa Maria summit and gas emitted from Santiaguito. (b) A closer view of the active dome and a lava flow. Gas obscures a small part of the summit, but image texture is good. Individual blocks on the lava flow can be detected as well as gross features like levees. Many details of texture seen in (b) are also well visible in (a), despite the distance change. (c) Blocky lava tongue below Santiaguito. The 10-m wide lava blocks are clearly discernible, and the lava surface, composed of smaller blocks, provides a well-textured image. There are two areas of degraded texture, one is the vegetated sides of the valley, and the other is the shadowed valley side. Note that while the texture given by the lava flow is excellent, it is a continually changing texture and it may not be possible to correlate from one set of images to the next.

be incremental. Deformation around a cryptodome being intruded is both gradual, as the magma fluxes into the edifice, and punctuated by sudden changes as the brittle volcano carapace fails.

While deformation, as described above, changes the shape of a pre-existing surface (maintaining the texture of that surface), there are many processes which emplace or remove material to create

entirely new surfaces. For example, emplacement of a lava or pyroclastic flow will provide a new surface. A sector collapse or steady erosion will remove old surfaces and expose new ones.

2. Currently available methods

Many techniques are currently used to study

Table 1
Methods presently used to study deformation, surface changes and morphology on volcanoes with their ranges and their precision

Methods	Principle	Instrumentation	Precision	Range
<i>Methods in the field</i>				
Field observations	Qualitative interpretation of field observations	x	x	x
Cartography	Field data compilations and map analysis	Field observations, photographs	x	x
Levelling	Vertical component displacement measurements	Theodolite, levelling staff	0.5–10 mm/km	1 m to tens of km
Strain meters	Length variation measurement on a small distance	Displacement sensor, various devices	under 1/10 mm. Up to 10^{-12} in terms of deformation rate	punctual
EDM (Electronic Distance Measurement)	Distance measurement using return of an EM wave.	1 transmitter-receiver (IR, laser), reflectors	3–5 mm+2–5 ppm of the distance	1 m–5 km
'Simple' measurements	Distance measurement with simple tools	Rules, tape, callipers	1/100 mm to cm	1–10 m
Tilt measurements (dry-tilt, wet-tilt, tilt meters)	Angle variation measurements	Precise optical levelling (dry-tilt), containers and pipes (wet-tilt), various device principles (pendulum, bubbles...)	lower than μrd up to 10 μrd	punctual
Space Geodesy (GPS and DORIS)	Relative positioning of points and precise localisation of stations on earth	2 receivers at least (GPS) and transmitters (DORIS)	centimetric	0–hundreds of km
<i>Techniques using images</i>				
Image analysis	Qualitative analysis of images (photographs, satellite images)	Image sensors	x	x
Photogrammetry	Measurements of object dimensions with stereoscopic couples of images (satellite images or aerial photographs). DEM generation	Calibrated sensor taking images	dm to m	tens of m to tens of km (aerial photographs); tens to hundreds of km (satellite images)
Radar interferometry	Phase difference between radar images, related to surface displacements. DEMS generation and improvement.	Presently: ERS1-2, RADARSAT, TOPSAR, SIR	Deformation: < cm DEMs: m–10 m	1 km to hundreds of km

deformation, surface changes and morphology on volcanoes (Sigurdsson et al., 2000). Two major classes can be recognised: techniques using synthetic images (aerial photographs and satellite images) and point-based measurement techniques.

Both aerial photographs and satellite images can be used to construct Digital Elevation Models (DEMs), these being 3-D topographic surface reconstructions. Construction of a DEM can be achieved using different methods, the more classical being digitalisation of maps and photogrammetry. Field measurement of deformation is achieved by levelling, tilt, and total station sur-

veys, strain meter measurements, GPS measurements, and laser measurements. Ground deformation can also be studied with radar interferometry and photogrammetry.

The detection limits of these methods are highly variable. Field-based techniques, in particular techniques using permanent measurement devices (for example tilt meters), can be very accurate (1 microradian), but for techniques using images, several parameters influence the precision of the measurement: image resolution, observation scale and numerical treatment. For DEMs obtained by photogrammetry, precision is from tens of centi-

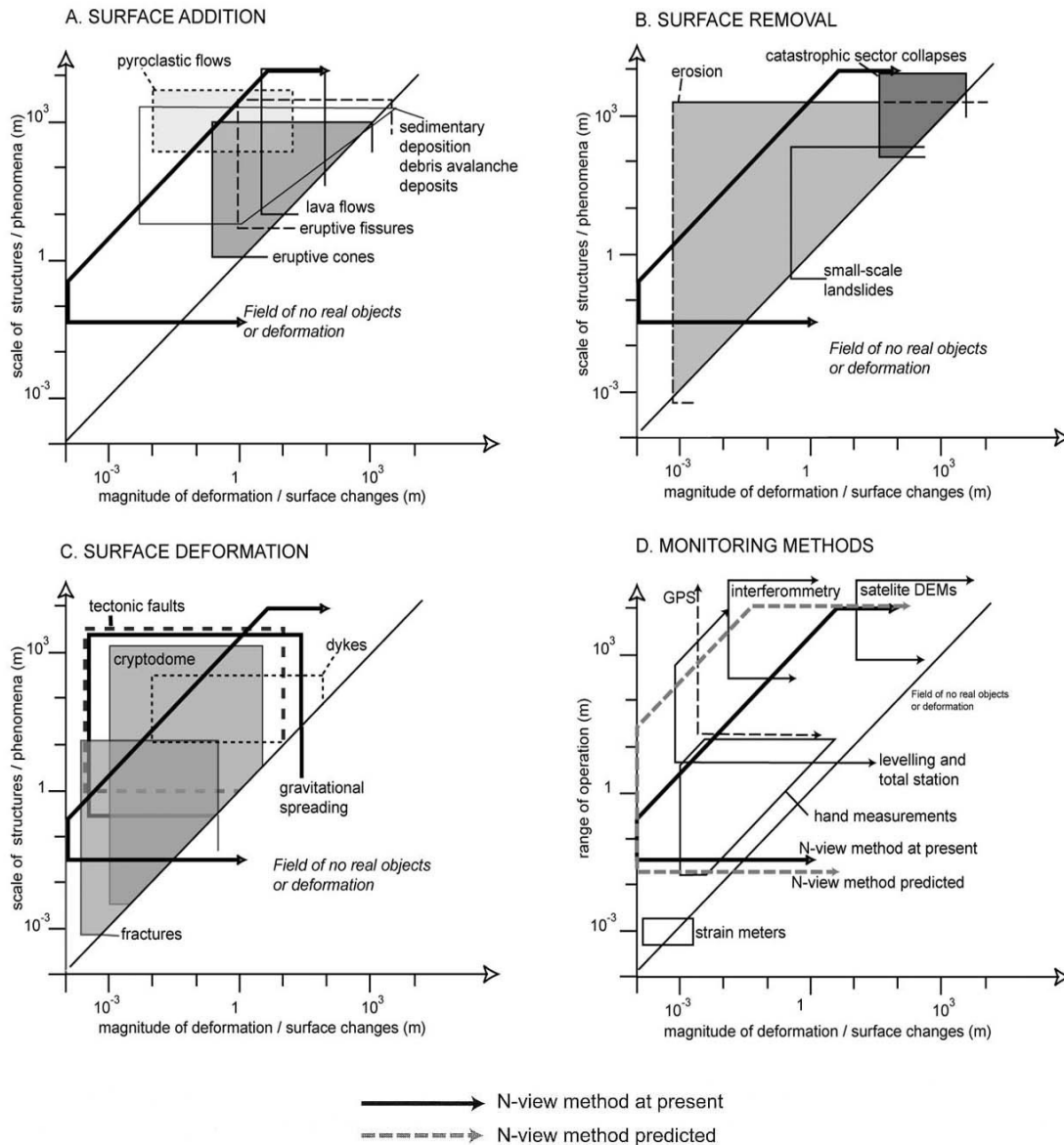


Fig. 3. Graphs showing different length scales for different volcanic phenomena (Y-axis) plotted against the magnitude of deformation expected in each case (X-axis). All fields shown are approximate and generalised. There are exceptions to many of these fields, but they serve as a rough overview of volcano morphology changes. (A) Surface addition: processes that add surface to a volcano. (B) Surface removal: processes that remove ground surface. (C) Surface deformation: processes that do not drastically change the texture of the surface, but deform it. (D) Monitoring techniques, plotted on the same graph scale as (A–C), with their range of operation and the magnitude of the deformation they can detect. The field presently possible with *n*-view videogrammetry is plotted on all four graphs.

metres for high resolution imagery (Gwinner et al., 2000) to tens of metres (satellite images).

Different methods of measurement are appropriate for different types or scales of deformation study. We provide a summary of length scales and deformation magnitudes for both monitoring techniques and volcanic phenomena (Table 1; Fig. 3). In Fig. 3 we plot the different volcanic surface change length scales against the rough magnitude of their deformation. We also plot the range of operation of each type of deformation measurement method. These graphs serve as a reference for planning any particular type of deformation study.

3. Volcanic terrain: what is the precision possible?

Measuring an object or calculating its surface precision is limited by the methods used as well as by the nature of the terrain. The nature of the ground may inhibit measurement. This is the case when abundant vegetation, snow or unstable scree cover up structures prohibiting successful air or satellite-based campaigns. Vegetation cover is perhaps the major problem. While bare ground can be resolved down to the centimetre, grassy land may be only resolved to the decimetre or metre. Trees represent the worst problem because they can cover the ground surface to a height of up to 60 m. In addition, trees (and grass) do not stand still, they wave and grow causing problems for image and radar-based measurements.

While the ground may be well exposed and sharply defined, image texture may be a problem. This is mainly a problem for photographic techniques. For example, a perfectly smooth and homogeneous surface does not allow correlation between images. However, it is quite unusual to encounter this in volcanic areas: volcanoes can provide well-textured images at all scales (Figs. 1 and 2). Note that when snow is present on a volcano, not only it may cover up structures, but it is also a surface devoid of texture (visually homogeneous). Finally, the ground surface may change so that the surface is no longer the same. Of course, in this case deformation may not be measured because of the texture loss in

the image, but other information can be extracted, like volume and altitude changes (using successive 3-D reconstructions from different times).

4. Multi-view reconstruction

4.1. Videogrammetry and multi-view reconstruction

3-D object reconstruction based on photographic analysis is one of the major problems addressed by in the field of Computer Vision. Numerous articles deal with the problem of N -view reconstruction and different approaches have been applied (Szeliski, 1993; Baratoff and Aloimonos, 1998; Fua and Leclerc, 1998; Prock and Dyer, 1998). Our recent studies in the field of Vision have shown the possibility of using new 3-D reconstruction tools in volcanology (Cecchi et al., 2001a,b).

Videogrammetry is, like photogrammetry, a technique that determines dimensions of objects using measurements done on digitised perspective views (Kraus and Waldhäus, 1998). While in photogrammetry measurements are usually performed from photographic film, videogrammetry directly uses numerical images (Atkinson, 1996).

The reconstruction process we present is aimed at quantifying morphological changes on volcanoes, a fundamental aspect of monitoring and hazard research. At present, stereophotogrammetric techniques, sometimes using highly advanced equipment (Gwinner et al., 2000), are predominantly used for 3-D reconstruction: they normally use techniques using near-vertical views. With such techniques it is difficult to measure a surface of complex geometry, especially steep features on cones and craters or failure scars. Moreover, these methods are cumbersome owing to intensive stereopreparation and the constraints on how pictures are taken, such as the need for near-vertical views (Zlotnicki et al., 1990; Kelfoun, 1999; Villeneuve, 2000). We present a different approach that circumvents these difficulties and provides an accurate shape reconstruction of volcanic surfaces. This approach is based on a very accurate calibration of the sensor (digital camera) and a

simultaneous use of N -views for 3-D reconstruction.

We use a reliable, quick and accurate camera calibration method (Lavest et al., 1998) in order to obtain the internal and external parameters of the sensor. Internal parameters that model the sensor correspond to the sensor focal length, the principal point coordinates in the image and the different polynomial coefficients modelling distortion, while external parameters are the rotation and translation between the camera referential and the object referential for each view. We have used this information (calibrated camera) as a starting hypothesis to develop an algorithm capable of producing accurate shape reconstructions of volcanic surfaces from N -views.

Once the sensor is calibrated, there are various ways of reconstructing the surface:

(1) Space carving: eroding an initial volume (containing the object), and keeping only the voxels (reconstruction volume unit) that belong to the object. These 3-D entities must be photoconsistent, i.e. the projected luminance is coherent in all views (Kutulakos, 2000).

(2) Point cloud: making a dense correlation of points in different images and triangulate in order to obtain a dense 3-D point cloud (Koch et al., 1998). Note that this is the reconstruction used in classical stereophotogrammetry to make DEMs (with pairs of views).

(3) Generic model deformation: constructing an initial generic mesh model and making an iterative deformation so that the projected luminance of each facet is coherent in all views.

All such methods can provide the type of reconstruction required. We chose just one for this work: the generic surface model, because in most cases we can start with a rough idea of the shape of the object (cone, crater). The generic model is probably the simplest computational method and most direct, as it deals with a surface. This method also allows a multi-scale approach, as different resolutions for the meshed model are possible.

4.2. Methodology of multi-view reconstruction applied to volcanology

We have tested the method in the laboratory on

analogue volcanic cones, with textures as close as possible to those encountered on real volcanoes.

The initial stage of the method consists of modelling the sensor and positioning external geometry. This involves establishing a mathematical relation between the 3-D point coordinates of a scene and the 2-D coordinates of the same points projected in the image. The multi-view calibration method chosen is based on a photogrammetric approach (Bundle adjustments: Beyer, 1992; Lavest et al., 1998) and takes into account distortion phenomena of the lens.

In practice two sets of views are taken:

(1) Calibration view set. Views around a calibration target (Fig. 4A), which is a flat surface with calibration points (white circles) roughly measured (points measured with a ruler at 0.5 cm precision for a target of about 1 metre across).

(2) Object view set. Views around the object (Fig. 4B), where a few white circles are visible. This set of views will be used for the reconstruction stage following the sensor calibration.

Both sets are combined in the calibration software to simultaneously compute internal parameters modelling the sensor, and external parameters giving the spatial location of each view. The calibration process gives internal sensor parameters with a residual measurement error close to 0.02 pixels.

This multi-view calibration method presents three major advantages: (1) an accurate knowledge of the calibration target is not necessary as its geometry is re-estimated (calibration point coordinates), (2) the use of several views allows reliable estimation of distortion parameters, and (3) the method allows sensor calibration in the field as easily as in the laboratory, at least for the internal parameter estimation (the external geometry estimation in the field will be discussed below).

Following the calibration stage, the reconstruction is done by iterative deformation of the generic model. The initial model corresponds to a conic surface, as the studied analogue models are sand and plaster cones. The generic model is composed of n facets and p 3-D points, where the number of facets can be defined for the required resolution. The diameter, height and position of

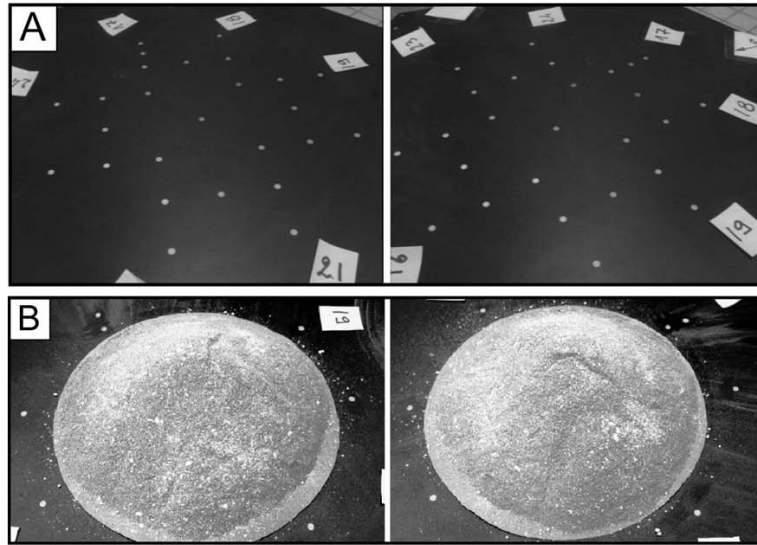


Fig. 4. (A). Two views (2000×1312 pixels) of the calibration view set. The calibration target is a black surface with reflecting spots (here 25 spots), which are roughly measured. Images are acquired around the target to create a convergent view bundle that can constrain the 3-D position of the target points. Spots should cover as much of each image as possible to give the best estimation of the distortion coefficients. (B) Two views (2000×1312 pixels) of the cone picture set. A few spots of the calibration target are visible and will ensure the calculation of the sensor position for each view (this is like having ground control points). The number of pictures around the cone for the reconstruction stage is variable and depends on the accuracy wanted. Generally, 8–15 images around the cone are used.

the initial generic cone are estimated during the initialisation stage (Fig. 5). As shown in Fig. 5A, three points selected by the user at the base of the cone in an image give, by ray tracing, their intersection with the base plane of the model (i.e. P1, P2, P3 points). The circle best fitting these three points is then estimated. We can then define the vector normal to the circle passing by its centre \vec{PS} . A fourth point selected at the cone summit in the image gives the cone height by calculating the point on the cone normal that is the nearest to the vector $\vec{C}_i\vec{S}$.

The model is then meshed and, for each facet of the model, images for correlation are selected. Each facet can then be correlated using a minimum of two views.

The generic model is then deformed to fit the real object. This deformation consists, for a given model resolution, of calculating the z coordinates of each p points of the model (facet summit) in order to have textured areas, resulting from the

projection of a facet in the pictures where this facet is visible, satisfying a coherence criterion (minimisation of the criterion). The unknown parameter vector (ϕ) and the optimisation criterion ($C(\phi)$) are defined by:

$$\phi = [z_1, z_2, \dots, z_p]$$

and

$$C(\phi) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{N_i-1} \sum_{k=j+1}^{N_i} (V_{ij} - V_{ik})^2 \right]$$

where:

(1) V_{ij} and V_{ik} are the centred and normalised luminance vectors of a facet i in the two images where the measurement is done. (When a luminance vector is centred, its mean is 0. Normalised means that the standard deviation is 1.)

(2) N_i is the number of views among the picture set where the facet i is visible ($N_i \geq 2$).

This criterion $C(\phi)$ corresponds to a centred normalised correlation between two luminance

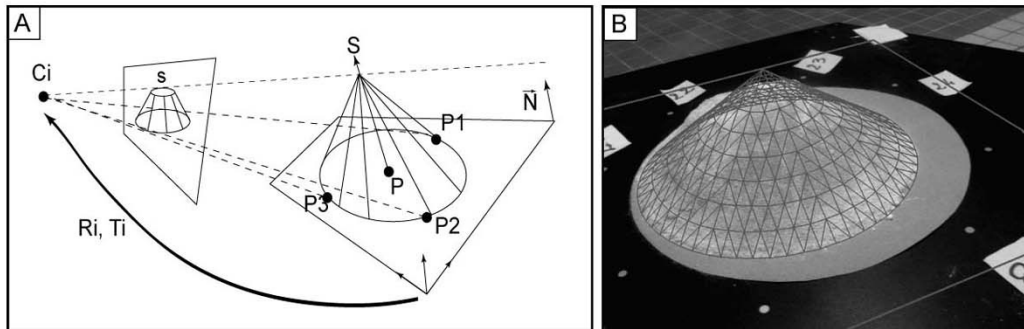


Fig. 5. (A) Initialisation of a model with a conic surface. C_i is the optical centre of the sensor. R_i and T_i are the rotation and translation between the camera and the object. Three points selected on the cone base in an image are traced along rays from the optical centre (C_i) to define points P_1 , P_2 , P_3 on the model base. The circle best fitting these three points is estimated. \overline{PS} is the vector normal to the cone passing by the ellipse centre. A fourth point selected by the user in the image gives the height of the cone by calculating the nearest point to the vector $\overline{C_iS}$. This point is on the straight line supporting the normal to the cone. (B) One of the real cone views and its projected generic model. The model is shown at a resolution 3 (512 facets).

vectors (Fig. 6). This mathematical formulation can take into account affine variation models (variations of the mean luminance value and the grey-level range). The Levenberg–Marquardt method (Press et al., 1992), is used for this non-linear optimisation. This algorithm combines advantages of both Newtonian and Gradient optimisation (Press et al., 1992).

4.3. Reconstruction results in the laboratory

The analogue models that have been reconstructed are either static (just sand and plaster cones) or dynamic due to a viscous silicone inclu-

sion within the cone that leads to surface deformation (van Wyk de Vries et al., 2000). Here we present the reconstruction results of a 10-cm-high static sand and plaster cone. In Fig. 7, the results from the optimisation for different resolutions of the meshed model are shown. The reconstructed surface is sufficiently accurate to highlight the main morphological characteristics of the cone, such as two nested scars on one flank produced by slumping during construction. This feature can be seen even at a quite low resolution (res.4 = 2048 facets), while at a higher resolution (res.6 > 30 000 facets) fine-scale textural irregularities due to grain flow are visible.

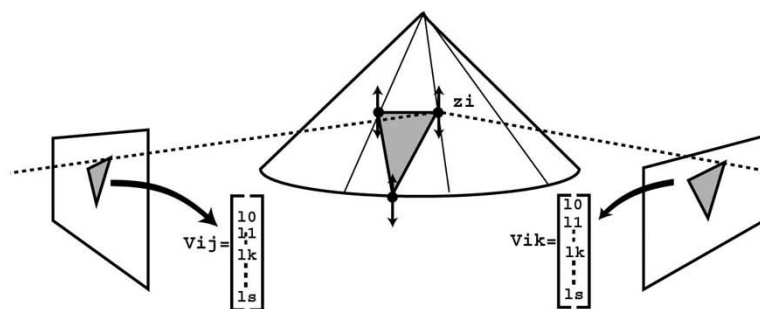


Fig. 6. Characterisation of a model facet in two images. z_i is the height of a point p (summit of a facet) of the model. l_0, l_1, \dots, l_s are the projected sampling point luminances of a facet i in the images selected for the matching of this facet. V_{ij} and V_{ik} are the centred and normalized luminance vectors of a facet i in the two images where the measurement is done. For a given model resolution, the z_i coordinates of the p points are calculated in order that the criterion $C(\phi)$ be minimum (§4.2).

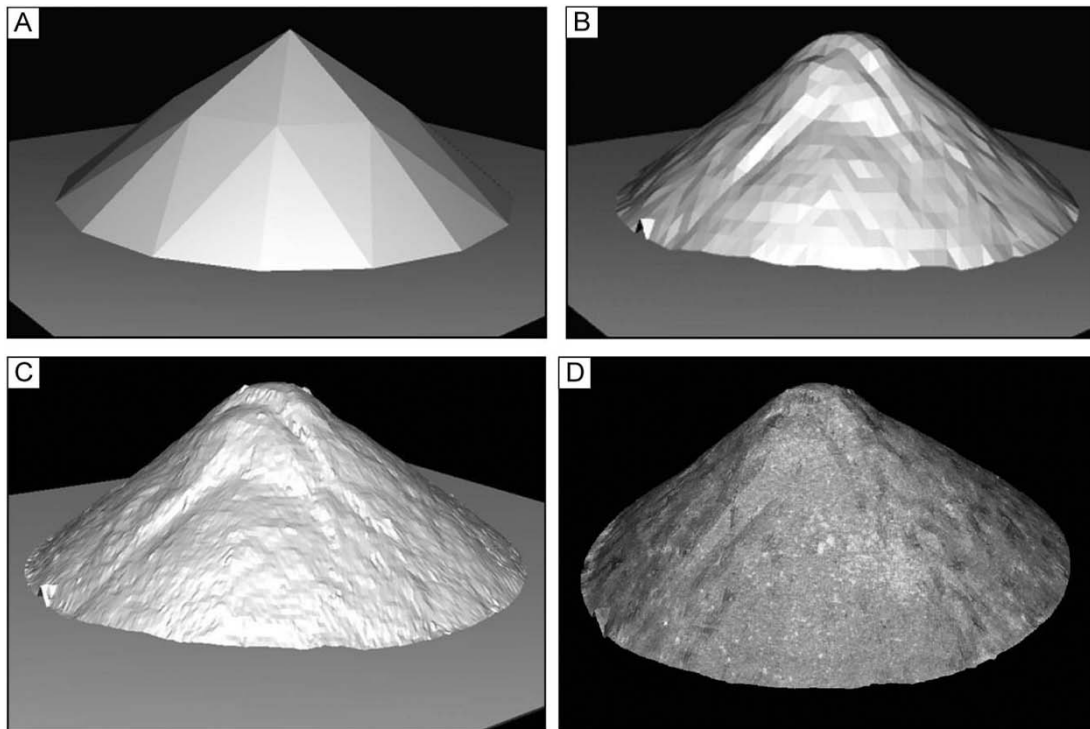


Fig. 7. Reconstruction results of a static cone for different mesh resolutions. (A) Result at a resolution 1 = 32 facets. The original cone is slightly flattened. (B) Result at a resolution 4 = 2048 facets. Two nested collapse scars are visible. (C) Result at a resolution 6 = 32768 facets. Surface irregularities due to grain flow are visible. (D) The same reconstructed model at a resolution 6 with the real texture reprojected.

4.4. Accuracy measurements

The reconstruction accuracy of the method has been tested using a textured PVC cone of known geometry (Fig. 8). We compare the known surface of the PVC cone with that of the reconstruction (summit angle) and we also calculate, in a least squares sense, the conic surface fitting all the reconstructed points. We have found a standard deviation of the distance between 3-D points of the reconstructed model and the theoretical surface fitting these points of 3×10^{-4} m, for a distance between the camera and the object of about 0.5 m. This result is highly dependent on the surface texture. In this example the texture was too coarse to achieve a higher accuracy (large homogeneous areas), and better reconstruction results

can be expected if the information on the surface is denser.

Of course, the reconstruction accuracy also depends on the sensor resolution. The pictures were taken with a Nikon D1 digital camera with a 2000×1312 pixel resolution and a coloured matrix. The resolution was sufficiently high to detect grain variations on sand cones as well as displacements under 1 mm. The elementary pixel size has to be adapted to the studied object (a compromise between sensor resolution and distance from the object).

Another parameter limiting method accuracy and critical for system convergence is the number of views used in the reconstruction process. To get the entire surface and overlapping areas, a minimum of pictures is needed. The number naturally

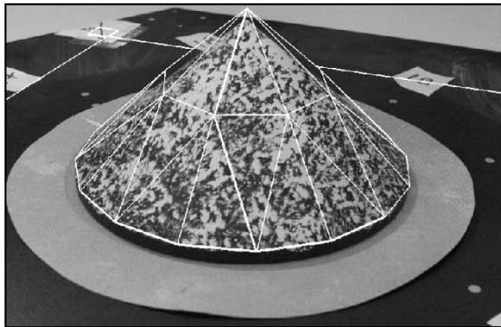


Fig. 8. A view of the PVC cone used for accuracy measurements and its projected initial model. A texture has been obtained by projecting light paint on a dark background. Large homogeneous areas can be seen. The texture is coarse and thus limits the reconstruction accuracy.

depends on the object size and complexity. As the algorithm takes several images into account for matching a single area, the more images available, the more information can be extracted and the higher the reconstruction accuracy.

5. Application of multi-view videogrammetry in the field: two preliminary textural case studies

The method we have set out here works well in the confines of a laboratory, and the precision achieved is high enough for it to be applicable to many field studies. There are, however, several differences between laboratory and field. We illustrate these using two preliminary field-based test cases. These study the textural richness of the images and the natural environment, and are used to explore the problems of obtaining multiple views of a natural object.

5.1. Possible field studies for the method in volcanology

At present, laboratory reconstructions have a tested accuracy of 1/1666 (or $3 \times 10^{-4}/5 \times 10^{-1}$; see Section 4.4) using a Nikon D1 digital camera with 2000×1312 pixel resolution. This precision, as mentioned above, is intimately linked to the

texture of the studied surface and a higher accuracy is expected if the texture information is denser. From the accuracy tests, the possible range of applications in volcanology can be assessed taking into account the studied phenomena or structure size and the present reconstruction precision. The different structures and phenomena that can be theoretically reconstructed with our present equipment can be gathered from Fig. 3.

Many volcanic phenomena and structures can be considered using our approach. For surface addition-related phenomena, the method has potential to track surface changes at eruptive cones, fissures and lava flow fields. Surface removal phenomena, such as collapse events (sector collapses and small-scale landslides), are well within the detection range of the method. Erosion can also be studied in the majority of cases. For surface deformation, the method could principally be applied to deformation related to fracturing, dyke intrusion and cryptodome emplacement. Tectonic and volcano–tectonic gravity spreading phenomena, which can have subtle surface changes compared with their size, and long time scales are not practicably detectable by the method at present, unless the movement rates are very large.

Compared with other monitoring methods (Fig. 3D), *N*-view videogrammetry method has the potential for a wide range of operation. This is because of its ability to operate at different temporal and spatial scales. Its maximum range of operation will be less than GPS, radar interferometry and satellite imagery. It can neither descend to the high precision of strain meters and other punctual measurement devices. Levelling, local GPS and total station surveys can rival or better the precision of our method, but they cannot give the same density of measurements. If there is vegetation, then these methods will be much more precise than the *N*-view reconstruction technique. In all probability *N*-view videogrammetry will work best in combination with GPS/total station work. In such a situation the survey points provide control and data for videogrammetry, while the method itself fills in the morphology or deformation field between points. If the study object is too dangerous to visit, then sensor positioned images can be used with limited ground control.

5.2. Transition between the laboratory and the field

Unlike natural volcanoes, the laboratory conditions are idealistic and in the field difficulties will result from differences in sensor positioning, textural information and lighting.

Sensor positioning is the main problem. Internal parameters of the sensor can be accurately known from a calibration stage that can be easily done in the field. It is sufficient to place some target points on the ground, roughly measure their location, and take several images. In the laboratory it is easy to estimate the camera position during the calibration process due to known ground control points. In the field such data are more difficult to obtain and camera positioning is more problematic. To determine a reference frame for the reconstruction model (positioning in an absolute referential), four accurately known ground points are necessary. Positioning the reconstruction model in an absolute reference system is not a necessity for the reconstruction process, but it will allow combination of the results with other data. For external geometry of the sensor itself, several situations can be envisaged according to the available input data (Fig. 9):

(1) More than four accurately known ground control points are available. If these are numer-

ous, it is possible to locate precisely the sensor in space (Dementhon method: Dementhon and Davis, 1992). If only four accurately known points are available, it is still possible to calculate the sensor position if some other roughly known points can be used. We can also imagine obtaining information on sensor position during picture acquisition using a GPS (for the X, Y, Z coordinates) and an Inertial Navigation System (INS used for sensor orientation). This can be used to optimise the different sensor positions and 3-D ground points or the sensor positions and the initial generic model.

(2) Less than four accurate ground control points are available. A 2-D/2-D matching (height points minimum in a picture pair) can be done with picture pairs. This will allow back-calculation of rotation and translation matrix of the sensor. If one or no point is available in the picture set, then we are not able to carry out a reconstruction process because of the need to know a scale factor (two accurately known points are enough).

Positioning ground control points in the field is costly in time and effort and is sometimes unachievable. Coupling the sensor with a GPS or an INS, or both, could also be costly. Thus, for different sites a strategy for the optimal combina-

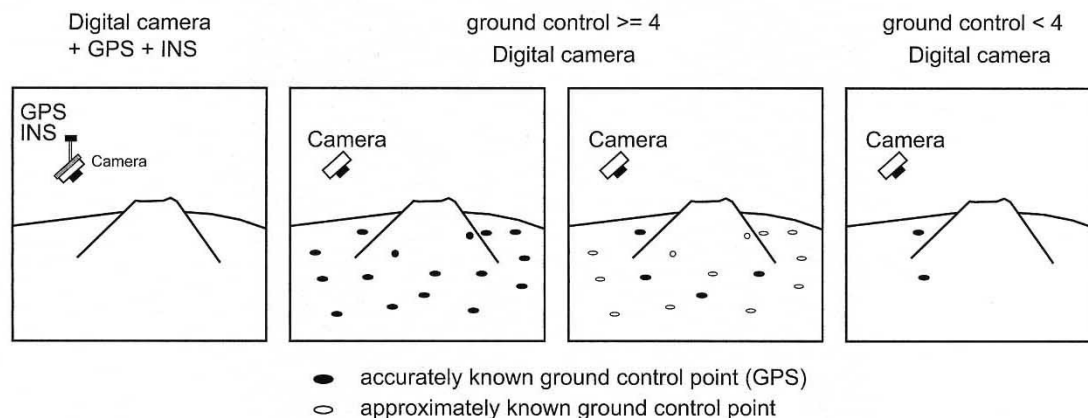
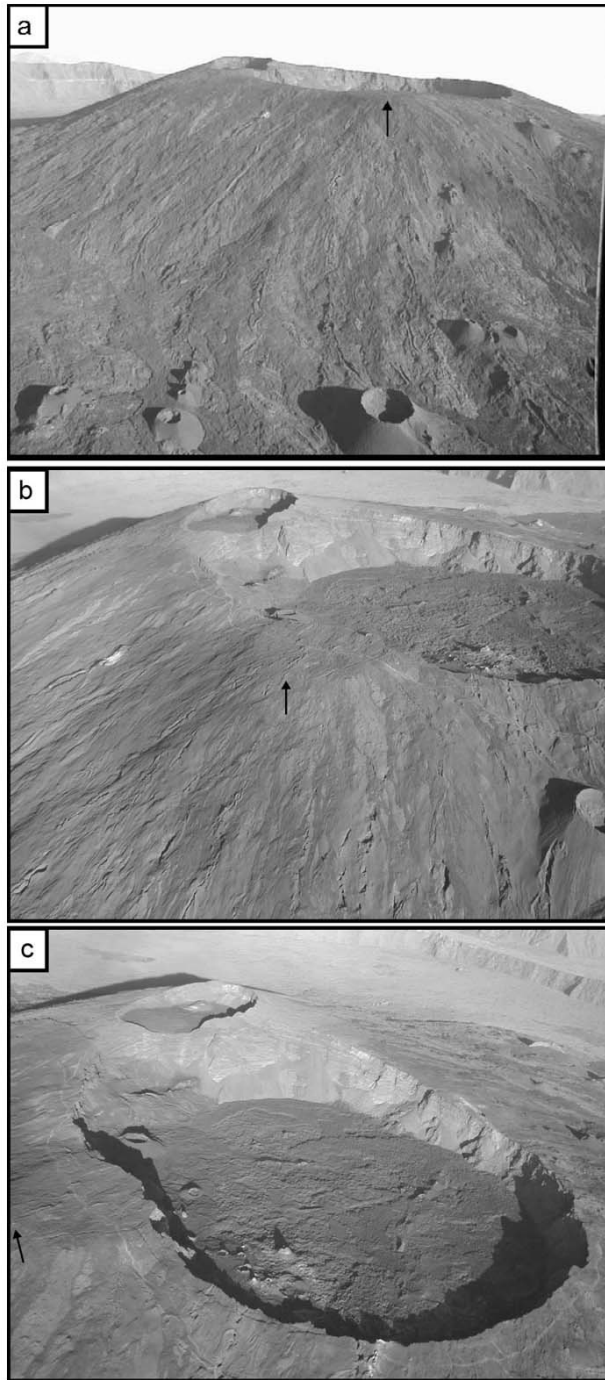


Fig. 9. The different possible situations of sensor positioning in the field. There are three main types: first is a coupling of GPS and INS with the camera. This gives the complete sensor position and orientation. Second, having many precisely-known ground control points, the sensor position can be estimated. Four known points and several roughly known points can also provide the sensor position. Third, with less than four points sensor positioning can theoretically be got by a 2-D/2-D matching between image pairs.



tion of the ground control points and sensor control needs to be worked out.

Textural problems are greater in the field. Differences between dark ground and light ground caused problems for Kerle (2001) during the computation of photogrammetric DEMs of Casita Volcano. For each site it is worth obtaining some images before the main campaign to assess textural problems, the best exposures, and sensor positioning issues.

Lighting must be sufficient to illuminate the object all around. While light intensity variations can be taken into account from a mathematical point of view (affine variation models), significant lighting changes in angle are a problem as they can modify shading. Thus, images should be taken as a group, during a short time period, and should be taken when the object is not in the shade on one side. This normally means not too early in the morning, but for some complex forms such as craters or cliffs it may mean not at mid-day. When taking images, say of a caldera, it is disadvantageous to walk the rim and take images as the sun would have moved significantly. Either several personnel would have to take simultaneous images or a fast mode of transport would be needed.

5.3. Piton de la Fournaise

The principle idea of taking an image set around the cone of Piton de la Fournaise was to see what could be seen from such images: what resolution and what geological features would become clear. A helicopter over flight was taken in a campaign with the Observatory. This was not a

dedicated flight, thus the exact flight path was not a perfect one for coverage of the cone, but nevertheless it provided good information on the conditions, times and distances needed for such a coverage. Images taken while flying over the cone show a great amount of detail (Figs. 1, 10 and 11). Lava channels are visible, and some textural variations within flows themselves. Pyroclastic slopes give mottled textures that can be correlated visually from one image to another (Fig. 11). Individual rocks are sometimes discernible, though mostly they are below pixel level.

One interesting check on the resolution of these images is to detect the permanent monitoring equipment. Small white boxes containing magnetometers and strain meters are present. These are about 1 m on their long axis. They are visible in all images as one or two bright pixels. Although box details are not clear, the long axis of boxes is discernible (Fig. 11).

Features that have fixed known locations provide useful data to ease computational time. On Piton de la Fournaise the ease of accessibility and dense monitoring network are particularly useful. The path system, marked with clear white spots, will also be a benefit at higher resolution.

Mottled texture in the images is clearly related to different pyroclastic clast sizes and concentrations or to lava lobe orientations on flows. Although the finer detail is not visible, these variations produce a pattern that can be correlated from one image to another. Finer resolution from better sensors will have the potential to descend to individual clast detail, and therefore provide a highly precise set of images for correlation.

The helicopter provided 15 min of flight time.

Fig. 10. Three images taken of Piton de la Fournaise central cone, with a Nikon Coolpix 700 in B/W and FINE jpeg compression, and 1600×1200 pixels. Even this simple camera provides good visualisation of metre-scale objects at 1 km distance. The texture of cones and lava channels is clear in these scenes, metre-wide fractures and paths can be seen. Texture details of the Chateau Fort cone seen at the bottom of (a) are given in Fig. 1. There are numerous white-painted monitoring stations on the volcano, many of these are shown locatable in the images as white pixels. One (also shown in detail in Fig. 11) is indicated by an arrow in each image. Such basic cameras are 'black boxes' and provide some undesirable features, such as a black line along the skyline in (a). The camera's matrix is made of RGB sensors which combine to make the pixel information. It is not clear exactly how this effects the resolution in B/W. In addition, jpeg compression, necessary to save the images to disk during a helicopter flight, reduce the quality of the image. Some of the area in each image is lost in deep shadow. To image the craters fully, the images would have to be taken as near to mid-day as possible, though the cone would have often been obscured by then. At higher resolution the tourists on the cone would be detectable. Tourists are mobile objects and would confuse correlation in localised areas.

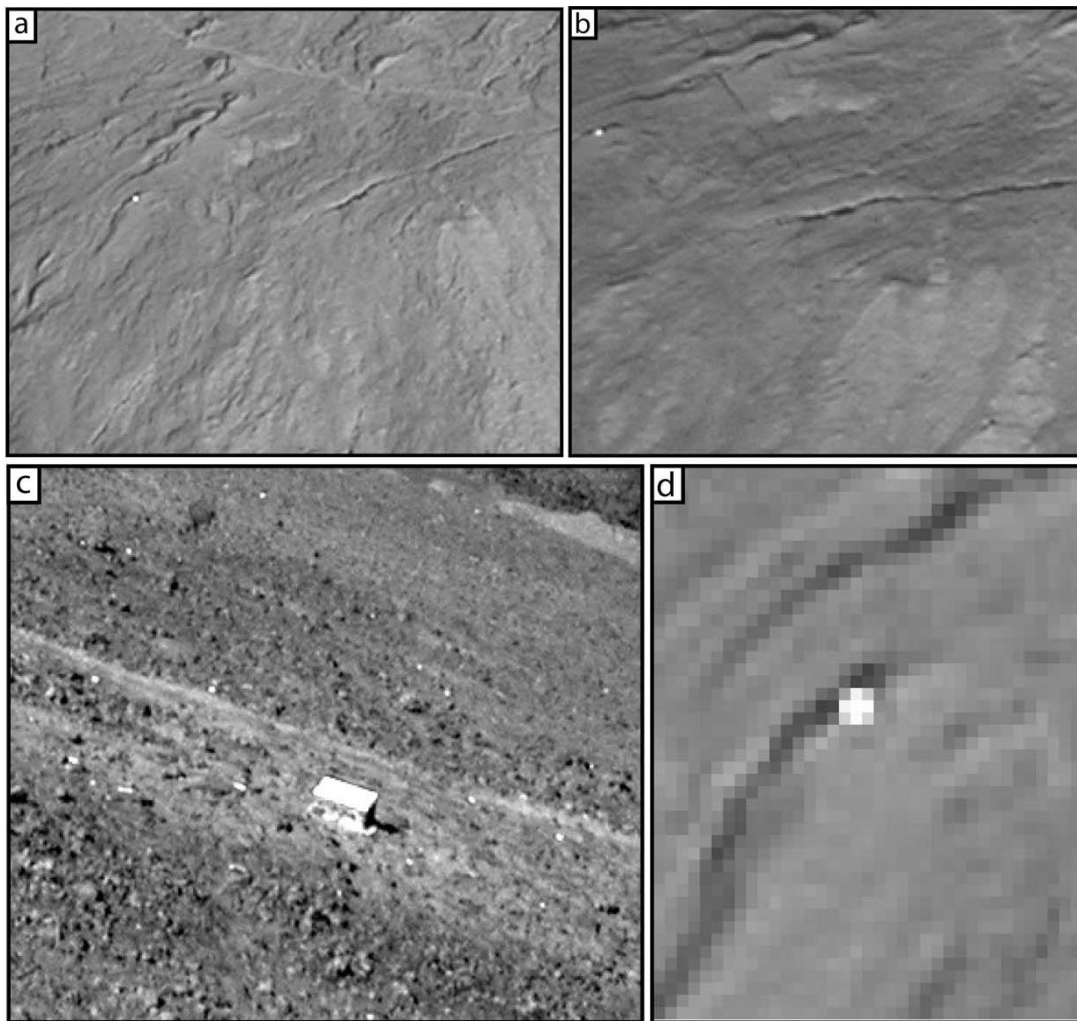


Fig. 11. Detailed images containing lava and ejecta textures and a monitoring box. (a) and (b) are details from Fig. 10b,c. Each field of view is about 100 m wide. Paths, fractures and a rippled, mottled surface are distinguishable. This is fertile texture for correlation. (c) Bow (not the box) taken from 20 m on the ground. It is about 1 m long. Note the fine texture of the stony surface, which gives rise to the mottled texture in the other images. A better sensor could make use of this finer texture. (d) Detail of the white box from (a) while the box is not clearly imaged, its contour parallel long axis is indicated by the two bright pixels in the middle of the bright spot.

We found it good for visibility, but rather fast, and unable to climb to a sufficient altitude. A better and cheaper alternative would be a light airplane. The plane is about one fifth of the cost and slow enough to provide a stable platform. A microlight aeroplane would be equally as good,

though lacking the manoeuvrability of the other modes.

5.4. Test on Santiaguito

We are planning to test our method on the

Santiaguito dome, Guatemala. In order to get information on the type of overflight necessary, the type of sensor to be used and the amount of ground and sensor position information required we took more than 100 photographs during a helicopter overflight in January 2001.

The images obtained were taken on a traditional reflex 35-mm camera with slide film, as the operators did not have a digital camera available. These are scanned at 3200 dpi and used for textural analysis. Camera location was obtained using kinematic GPS, with a roving unit attached to

the helicopter and a base-station below the flight path. By recording a way-point on a hand-held GPS during each photo acquisition, the approximate location of each photograph can be obtained using the GPS clock. Ground control points were obtained on the dome using triangulation to stable points from GPS-fixed locations.

For this case, there are three scales of data required:

(1) A low resolution 10–30 m scale to provide the morphology of the entire Santiaguito and Santa Maria Edifice.

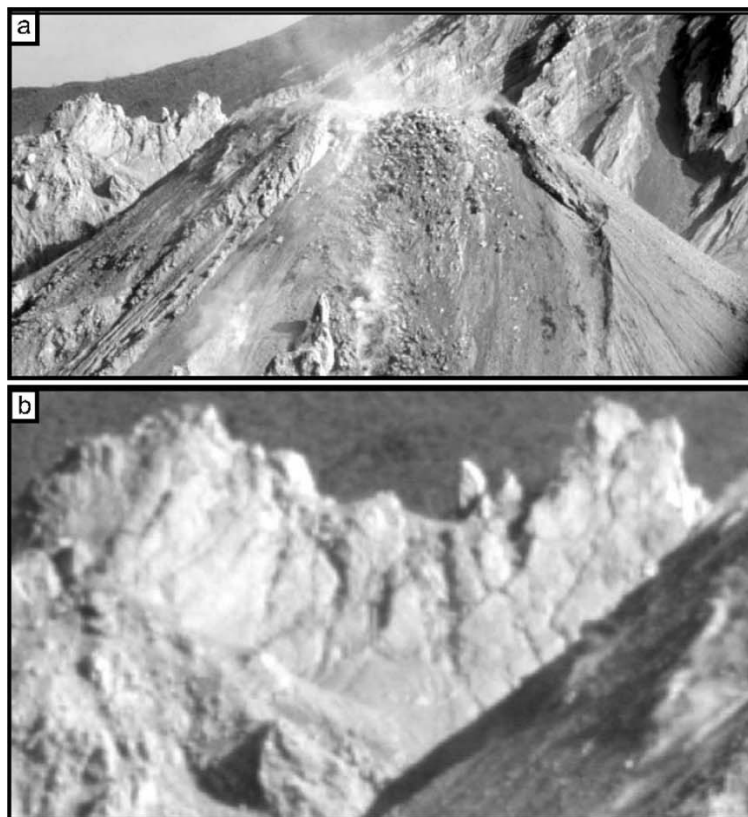


Fig. 12. Two images of the Santiaguito dome, illustrating the detail observable, and some sampling problems. (a) The summit area of the 'El Brujo' vent, which is about 40 m wide. Blocks and scree texture can be seen, with a slight haze from gas emission. (b) Detail from (a), showing the pinnacles of an inactive lava spine about 30 m long. Fissures and some surface details as well as blocks of scree are clearly detectable. Contrast is good in most areas, there are some multi-pixel areas of white and black. Note that this series of photographs did not manage to image the back of the cone or this spine, due to the presence of the Santa Maria.

(2) A 1–5-m scale resolution for monitoring the blocky lava flow development. Here the lava flow texture will change from year to year, so detection of fixed points is not a priority, whereas the surface form is.

(3) A fine cm-scale resolution on specific areas that may record inflation or deflation of the dome. As much of the dome's texture may change from year to year, this is only possible on certain points or areas.

Seen in Fig. 2, the sample images show that on most of the Santiaguito edifice there is sufficient texture for a fine-scale analysis. The low resolution scale is easily manageable with the type of overflight used. The medium resolution will also be attainable, as resolution of block, scree and lava texture is good (Fig. 12). However, although the fine detail on the dome seen in Fig. 12, such as fractures and blocks of about 10 cm diameter, more work and perhaps higher resolution images may be required for cm-scale deformation.

5.4.1. *Lighting and visibility problems*

The lighting and texture on the images are good. There are few areas of deep shadow, and no overly bright patches of little detail, even on the scree slopes. The gas from the cone obscures areas in some images but not in others. This indicates that the use of numerous images may reduce gas problems. The clouds are covering the higher part of Santa Maria, but they have not produced shadows on the dome, and for the low resolution work on the forested cone they may not present a problem.

5.4.2. *Ground and sensor control*

There are few ground control points in the images. Unlike Piton de La Fournaise, Santiaguito is a very dangerous place and thus less accessible. A few differential GPS points off the dome will have to be set up.

In view of the paucity of the available ground control points, calculating the spatial attitude of the sensor using a positioning system (coupled to the sensor) in the field is an attractive option. The images of 2001 were located by a differential GPS strapped to the helicopter, giving about 1 m distance from the sensor. As each image was taken a

GPS reading was made. There is an unknown delay between this reading and the sensors, giving a greater (unknown) error related to the helicopter speed. The data are useful in giving the rough position of the sensor, and this helps the initial computations. A more precise system would of course be helpful (but again not strictly necessary).

5.4.3. *Flight path*

While the flight path around the western side of the dome is good, providing many views, the Santa Maria side and high angle photographs were not taken. This is because helicopter time was limited and the pilot would not, understandably, fly directly over the active dome, which emits ash plumes to ~1 km every ~30 min. The first problem can be overcome by having an image taken during the overflight by a group stationed on the summit (perhaps with the differential GPS base). The second problem may be overcome by using a light plane, which could fly over the dome at a higher and safer altitude than a helicopter.

5.5. *Comparison of Santiaguito and Piton de la Fournaise*

Santiaguito presents many of the same conditions as Piton de La Fournaise: image texture is excellent, the images have good contrast and are rich in information. In places they are degraded by vegetation and moving lava. The images are of reasonable resolution (< 1 m), and promise higher resolution when better sensors are used. Lighting on Santiaguito is better, and both suffer from cloud and gas degradation. The major contrast is in the availability of ground control. Santiaguito is where the automated calibration and camera positioning should be most valuable. While it is desirable to acquire as much ground control and sensor positioning data as possible, the method can work well with a minimum and so avoid costly and dangerous fieldwork.

6. Discussion

Videogrammetry is already in use for mapping

in earth science (Gwinner et al., 2000), but reconstruction techniques are still based on those used in classic vertical stereophotogrammetry. The originality of the method described here is contained in our multi-view reconstruction approach and the calibration method. Taking pictures all around an object and using all of them for its reconstruction is, in a sense, a more instinctive approach than capturing only vertical views of object. The simultaneous use of multiple views allows capture of denser information on the studied object than a single or a couple of views. It also provides a 3-D model that is photoconsistent (visually coherent) in all views, especially side views that give essential depth information. Our approach uses an initial model, which can be adapted according to the studied surface (cone, crater, planar surface, rough DEM), to help the system to converge.

Laboratory tests on the reconstruction accuracy show that the application field of the method in volcanology is potentially wide. In theory, all the phenomena and structures related to ground deformation and surface change are likely to be detectable, except when ground deformation and surface changes are very small compared to the length scale phenomena (Fig. 3). Of course, the given application field of the method has to be taken with caution as it is based on values determined in the laboratory, where idealistic conditions are present (no weather whims, controlled lighting). However, if the sensor resolution is high enough to get the required information and if conditions in the field are like those provided in the two field studies, the given application field remains correct. Reconstruction techniques like radar interferometry or classical aerial photogrammetry remain the most suitable methods to produce DEMs of large areas (tens to hundreds of kilometres) and for monitoring extensive deformation, because it is simpler to image wide regions from satellite or high altitude flights rather than from a helicopter or light plane.

Providing satisfactory field conditions, reconstruction accuracy could potentially be several orders of magnitude higher than the given one with fine texture and high precision sensors. Satisfactory field conditions are a well exposed surface,

no abundant snow, scree or vegetation, an optimal incidence angle for light depending on the studied object, good atmospheric conditions (no clouds between the sensor and the object, for example) and little volcanic gas. This imposes many limits, but is inevitable when using optical images as the data source.

The two preliminary field studies show that with some adjustments allowing flexibility in the input hypotheses (ground control points, data on sensor position), the method promises to work for very different field situations. We aim to keep the amount of ground control to a minimum, to make the method the most versatile. If an absolute positioning is not required, positioning the sensor is mathematically possible if two ground control points are accurately known, because just two are necessary to set up the metrics. However, more ground control points and data on sensor position will be of valuable help in computations.

Time-successive DEMs of the same surface can be used to study deformation and volume changes. However, DEMs alone are not sufficient to obtain 3-D deformation. For 3-D ground deformation monitoring, a complementary tool of texture tracking is desirable: texture of the surface has to be tracked over time. An automatic texture tracking tool using the reconstructed models is actually in development.

Other complementary tools could also be useful, such as the fixing of the reconstructed models in the same geographic reference system for time-successive DEM comparison; creating an interactive interface allowing the choice of the initial generic model, the ability to integrate other data types. Some of these are already available in GIS packages, and will help to broaden the application and usefulness of the *N*-view videogrammetry method.

7. Conclusions

We have presented here a videogrammetric method used for *N*-view reconstruction of volcanic features. The method has been tested in the laboratory, and we also present preliminary

field tests dealing with textural and resolution aspects. We are able in the laboratory to reconstruct accurately the surface of naturally textured sand cones. The textural studies in the field indicate that, bar some important restrictions, the same high quality of image as in the laboratory can be acquired over volcanic terrain. Thus the method will be able to provide high quality reconstructions.

The advantages of the method are:

(1) The volcanologist requiring data is involved in the intimate planning of data acquisition and treatment, in order to provide the right information needed. This differs from other photogrammetric techniques where the method often rules the acquisition strategy.

(2) The production of a visual reconstruction of the feature provides an important framework for many other types of study such as structural, geophysical, or morphological. It is very visual and can be used to convey information about hazards clearly.

(3) Views from many angles give a complete 3-D reconstruction. Problems of reconstructing cliffs, crater edges, generally encountered by traditional methods, are removed. The method can be used for near planar surfaces (vertical to horizontal), for cones, domes and craters, lava lobes, pyroclastic flow details, debris avalanches, and erosional features.

(4) The method aims to operate as independently as possible from other data sources, thus ground control and sensor position control are kept to a minimum. This aids easy data acquisition. However, such controls can be used if they are easily available.

(5) Matching of data sets taken at different time intervals can be used to monitor deformation or surface changes such as erosion. The potential maximum reconstruction accuracy has yet to be determined in the field and is constrained by the sensor type, the fields of view (distance from object) and the objects dimensions, texture, and local atmospheric conditions. However, laboratory testing and the field studies on Piton de La Fournaise and Santiaguito, done with simple digital cameras, suggest that over km-to-cm scale, a

high accuracy will be attainable under optimal conditions.

The *N*-view videogrammetry method has the potential to provide a cheap and efficient monitoring method, that will be useful for many types of volcanic hazard monitoring. At large scales and low resolutions it will provide good 3-D surface information for volcano geomorphology and structural studies. At the 1–5-km scale, precision is potentially high enough to chart deformation associated with dyke intrusion, and easy enough to follow dome and cryptodome growth. At smaller, more local, scales it could be used for volume estimates on lava and pyroclastic flows and erosion as well as for charting the growth of cones. At the outcrop scale it can be used for highly precise surface reconstruction and for local deformation field monitoring.

The *N*-view videogrammetry method is not as precise as punctual measurements of, say strain or tilt, but over kilometres it can potentially provide similar accuracy to GPS, classical survey and interferometry. The method suffers from the usual problems of visual techniques: cloud, gas and atmospheric changes degrade accuracy or stop it working. Its main advantage over the traditional photogrammetry is the ease of operation, and the increased 3-D capability. It is also more versatile, in that it can be adapted to different scales, textures and shapes, giving the user more control on the type of data produced. The method should be seen as a multi-purpose tool that can compliment most other monitoring techniques. We aim to make the method widely available in a simple form for use at any interested volcano observatory or research unit.

Acknowledgements

The images of Piton de la Fournaise were gathered with the aid of Thomas Staudacher, director of the Observatoire du Piton de La Fournaise. Logistics of La Réunion were aided by Bernard Robineau and Patrick Bachèlery, University of La Réunion. The La Réunion part was funded through the PNRN. The CRV provided financial

support. The Guatemalan Army provided helicopter time.

References

- Atkinson, K.B., 1996. Close-Range Photogrammetry and Machine Vision, pp. 52–76.
- Baratoff, G., Aloimonos, Y., 1998. Changes in surface convexity and topology caused by distortions of stereoscopic visual space. Proc. 5th European Conf. on Computer Vision, pp. 226–240.
- Beyer, H.A., 1992. Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System. Ph.D. Thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 51, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich.
- Borgia, A., 1994. Dynamic basis of volcanic spreading. *J. Geophys. Res.* 99, 17791–17804.
- Bruno, B.C., Taylor, G.J., Roland, S.K., Lucey, P.G., Self, S., 1992. Lava flows are fractals. *Geophys. Res. Lett.* 19, 305–308.
- Cecchi, E., Lavest, J.M., van Wyk de Vries, B., 2001a. Videogrammetric reconstruction applied to volcanology. 8th European Congress of Stereology and image analysis, Bordeaux, Sept. 2001.
- Cecchi, E., Lavest, J.M., van Wyk de Vries, B., 2001b. Perspectives for the use of multi-view, multi-position digital photographic 3-D morphology reconstruction in volcano monitoring. EUG XI Strasbourg, 2001. *Journal of Conference Abstracts* 6, p. 821.
- Dementhon, D.F., Davis, L.S., 1992. Model based Object pose in 25 lines of Code. Proc. European Conference on Computer Vision, ECCV 92, Santa Margarita Ligure, pp. 12–22.
- Donnadieu, F., 2000. Déstabilisation des edifices volcaniques par les cryptodômes: modélisation analogique et approche numérique. Ph.D. Thesis, Blaise Pascal University, Clermont-Ferrand II.
- Francis, P.W., 1993. *Volcanoes, A Planetary Perspective*. Clarendon Press, 443 pp.
- Fua, P., Leclerc, Y.G., 1998. Registration without correspondences. Proc. Computer Vision, pp. 226–240.
- Gwinner, K., Hauber, E., Jaumann, R., Neukum, G., 2000. High-resolution, digital photogrammetric mapping: A tool for earth science. *EOS* 81 (44).
- Kelfoun, K., 1999. Processus de croissance et de déstabilisation des dômes de lave du volcan Merapi (Java Centrale, Indonésie). Ph.D. Thesis, Blaise Pascal University, Clermont-Ferrand II.
- Kerle, N., 2001. Volume estimation of the 1998 flank collapse at Casita volcano, Nicaragua – a comparison of photogrammetric and conventional techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* (submitted).
- Koch, R., Pollefeys, M., Van Gool, L., 1998. Multi view-point stereo from uncalibrated video sequences. Proc. ECCV98, Freiburg, pp. 55–71.
- Kraus, K., Waldhäus, P., 1998. *Manuel de Photogrammétrie, Principes et Procédés Fondamentaux*, Hermès Editions.
- Kutulakos, K.N., 2000. Approximate n -view stereo. Proc. of ECCV2000, Dublin, pp. 67–83.
- Lavest, J.M., Viala, M., Dhome, M., 1998. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration. Proc. ECCV98, Freiburg, pp. 158–174.
- Macdonald, G.A., 1972. *Volcanoes*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 510 pp.
- Murray, J.B., Voight, B., Glot, J.P., 1994. Slope movement crisis on the East flank of Mount Etna volcano: Models for eruption triggering and forecasting. *Eng. Geol.* 38, 245–259.
- Press, W.H., Vetterling, W.T., Teukolsky, S.A., Flannery, B.P., 1992. *Numerical Recipes in C*, 2nd. ed. The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, pp. 683–688.
- Prock, A.C., Dyer, C.R., 1998. Towards real-time voxel coloring. Proc. Image Understanding Workshop, pp. 315–321.
- Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, New York, 1417 pp.
- Szeliski, R., 1993. Rapid octree construction from image sequences. *CVGIP, Image Understanding* 58.
- van Wyk de Vries, B., Kerle, N., Petley, D., 2000. A sector-collapse forming at Casita volcano, Nicaragua. *Geology* 28, 167–170.
- Villeneuve, N., 2000. Apports multi-sources a une meilleure compréhension de la mise en place des coulées de lave et des risques associés au Piton de la Fournaise. Ph.D. Thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, Département des Observatoires, Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise, La Réunion.
- Williams, H., McBirney, A.R., 1979. *Volcanoes*. Freeman, Cooper, San Francisco, 397 pp.
- Zlotnicki, J., Ruegg, J.C., Bachèlery, P., Blum, P.A., 1990. Eruptive mechanism on Piton de la Fournaise volcano associated with the December 4, 1983, and January 18, 1984 eruptions from ground deformation monitoring and photogrammetric surveys. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 40, 197–217.

4.3 RECONSTRUCTION DU PITON DE LA FOURNAISE

Une mission d'acquisition de données sur le Piton de la Fournaise, île de la Réunion, a été réalisée en avril 2002, afin de tester la méthode de reconstruction multi-vues.

4.3.1 LE PITON DE LA FOURNAISE : PRÉSENTATION

Le Piton de la Fournaise, situé sur l'île de la Réunion, dans l'océan Indien (Figure 4-1), est un volcan français extrêmement actif, vieux de plus de 500000 ans (Bachèlery and Mairine, 1990). Depuis une vingtaine d'années, 35 éruptions ont été enregistrées, soit près de deux éruptions par an en moyenne. Ce volcan bouclier est caractérisé par une activité récente essentiellement effusive, ponctuellement plus explosive (phréatomagmatisme). Géographiquement, il occupe la moitié SE de l'île, la moitié NO étant occupée par le Piton des Neiges, un édifice volcanique plus ancien dont la dernière activité a été estimée à 10000 ans (Figure 4-1). Le Piton de la Fournaise présente une morphologie assez complexe (Kieffer, 1990) : un cône principal d'environ 400 mètres de haut et 3 km de diamètre s'est développé depuis près de 5000 ans au sein d'une caldeira, dont l'origine est encore discutée, nommée Enclos Fouqué. Ce cône également appelé cône central ou cône terminal culmine à 2631 m d'altitude et présente deux cratères sommitaux : le cratère Bory à l'Ouest et le cratère Dolomieu, plus grand, à l'Est. La caldeira présente une forme de fer à cheval : elle est bordée de toute part par une importante falaise (rempart de Bellecombe), excepté à l'Est où elle s'ouvre sur la mer (Figure 4-2). Une zone de forte pente, appelée Grand Brûlé, prolonge la caldeira et caractérise le flanc Est du volcan. C'est dans la région de l'Enclos et du Grand Brûlé que se localise la majorité des éruptions (95% des éruptions historiques enregistrées depuis 1700 environ, Kieffer, 1990). La partie Ouest du volcan est quant à elle marquée par l'érosion et présente des figures singulières similaires à l'Enclos (Figure 4-1) : deux plaines successives, la plaine des Remparts et la plaine des sables, sont délimitées respectivement par la rivière des Remparts et le rempart des sables, et sont interprétées comme étant d'anciennes caldeiras (Bachèlery et al., 1990).

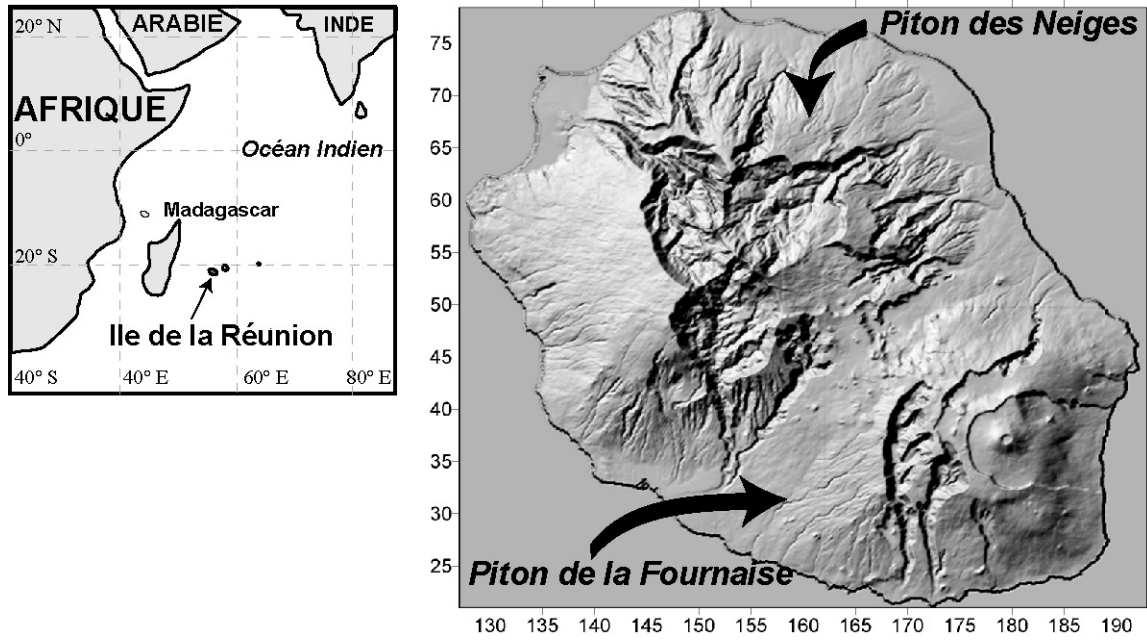


FIGURE 4-1 : LOCALISATION DE L'ÎLE DE LA RÉUNION ET MNT DE L'ÎLE AU 100 M. (IGN).

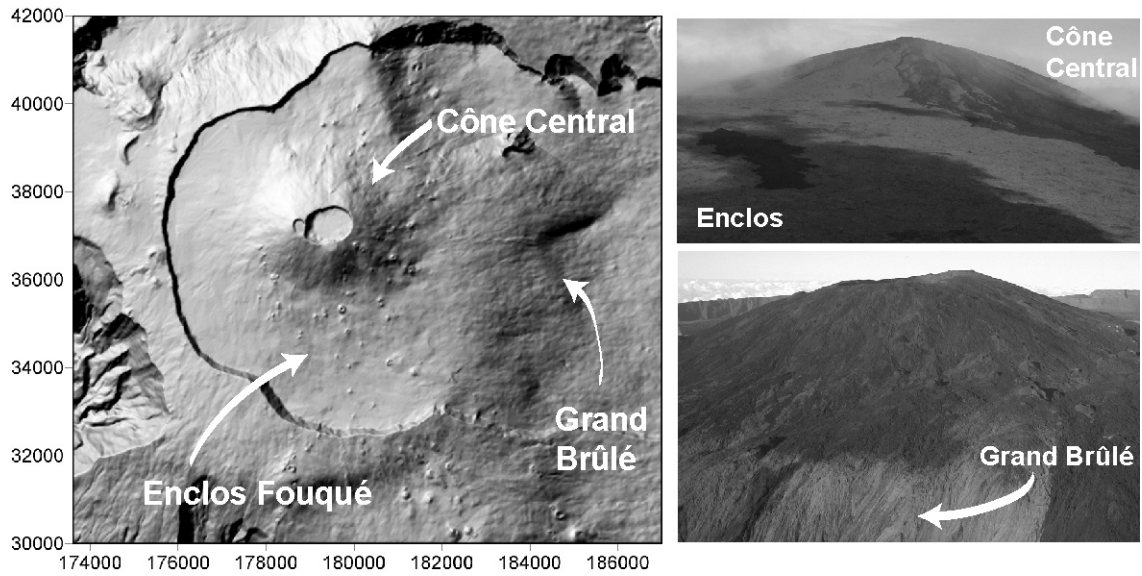


FIGURE 4-2 : ZOOM SUR LE PITON DE LA FOURNAISE (CÔNE CENTRAL ET ENCLOS FOUQUÉ) : MNT (25 M., IGN) ET PHOTOS DU CÔNE CENTRAL. EN HAUT, VUE DU FLANC NORD-OUEST DU CÔNE. EN BAS, VUES DU FLANC EST DU CÔNE.

4.3.2 CHOIX DU SITE ET OBJECTIFS DE LA MISSION

4.3.2.1 Choix du site

Divers éléments ont motivé le choix du Piton de la Fournaise.

En premier lieu, le site présente un ensemble de conditions favorables à l'application de la méthode de reconstruction multi-vues. Tout d'abord, le volcan est relativement facile d'accès, et, hors période éruptive, peut être parcouru et approché de près sans danger. D'autre part, le cône est dépourvu de végétation et l'activité intense et régulière du volcan confère à la surface une texture riche et diverse, faisant du volcan un bon candidat pour la réalisation d'images texturées. Un autre aspect pratique jouant un rôle dans le choix du site est la possibilité d'organiser aisément un survol du volcan avec le moyen de transport de son choix : hélicoptère, avion etc. Enfin, le climat de l'île et les conditions météorologiques sur le volcan sont propices à une acquisition de vues de bonne qualité (pas de nuages ou de neige sur l'édifice par exemple). Le choix de la saison est réalisée de manière à optimiser les chances de bonnes conditions de prise de vues (début de l'été ou de l'hiver). Il en va de même pour le moment de la journée où sont acquises les vues, et pour lequel un compromis doit être réalisé entre l'heure où la position du soleil minimise les ombres sur le site (Cecchi et al., 2003), et l'heure où généralement une couverture nuageuse s'installe sur le volcan en raison de phénomènes météorologiques locaux.

En second lieu, le volcan, très actif, bénéficie d'une surveillance régulière et performante, et fait l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique. De nombreuses données sont donc disponibles sur le Piton de la Fournaise, parmi elles des données concernant la topographie (MNT) et la déformation du volcan, ce qui représente un avantage non négligeable pour notre application. En effet, un MNT du volcan peut par exemple être utilisé pour la phase d'initialisation du modèle 3D, ou peut servir d'élément de comparaison final. Il peut également aider à la planification de la mission. Un autre élément de choix, lié à l'activité importante et fréquente du volcan, est le besoin de renouvellement des données concernant la morphologie et les structures de l'édifice, et la possibilité d'exploiter des résultats de reconstruction sur une échelle de temps relativement courte (variations morphologiques fréquentes).

La mission réalisée en avril 2002 s'est inscrite dans un projet plus vaste financé par une ACI du ministère de la recherche concernant les catastrophes naturelles (ACI CATNAT 2001). Le projet sollicité concerne l'étude des signaux électriques et magnétiques sur les volcans. La réalisation d'une reconstruction précise du volcan, notamment sa partie sommitale, permettrait une cartographie fine des fractures dont l'analyse, combinée à des données de Polarisation Spontanée, apporterait des contraintes sur le système hydrothermal du volcan, et aiderait à une meilleure compréhension de ce type de signal sur les volcans. Ainsi, la mission d'acquisition des données pour une tentative de reconstruction selon la méthode multi-vues a été réalisée simultanément à une mission d'acquisition de données électriques au sommet du volcan.

4.3.2.2 Objectifs de la mission

Un repérage du site et une évaluation des conditions d'acquisition des vues ont été réalisés en novembre 2000 (paragraphe 4.2). Cette première mission a permis d'évaluer quelles étaient les possibilités de reconstruction du volcan selon la méthode de reconstruction multi-vues et de planifier la mission d'avril 2002.

Objectifs

L'objectif principal de la mission est de (1) tenter la reconstruction du cône central du Piton de la Fournaise à partir de vues aériennes acquises autour du volcan. A l'échelle de l'édifice (kilométrique), la précision de reconstruction envisagée, d'après les résultats de précision en laboratoire (paragraphe 4.2, Figure 3), est au moins métrique. De cette tentative de reconstruction, l'on attend également (2) la mise en évidence de problèmes relatifs à l'adaptation du code à une application terrain. Après avoir qualitativement estimé le potentiel de la méthode de reconstruction sur le terrain grâce à l'étude figurant dans Cecchi et al. (Cecchi et al., 2003, paragraphe 4.2), cette tentative de reconstruction permettra de (3) faire le point sur le potentiel effectif de l'application de la méthode au terrain.

Nous avons décidé que, dans le cadre de cette mission, seul le processus de reconstruction sensu stricto de la méthode serait testé. En effet, le processus initial de calibrage du capteur constitue un problème majeur lors du passage laboratoire / terrain qu'il conviendrait de traiter séparément (paragraphe 4.2, section 5.2 « Transition between the laboratory and the field »). Pour rappel, la difficulté revient à estimer très précisément la position et l'orientation du capteur, qui sont calculées en laboratoire grâce à des tâches détectées automatiquement et recalculées lors du processus de calibrage. Or un dispositif identique n'est pas envisageable sur le terrain, et une étude indépendante des diverses possibilités de calcul de pose dans un tel contexte serait nécessaire, mais ne constitue pas une priorité pour nous. Soulignons que les conditions de terrain en contexte volcanique feraient plutôt appel aux solutions proposées par les méthodes d'autocalibrage où aucune information 3D n'est théoriquement nécessaire (paragraphe 2.2.1.2 chapitre 2).

Ainsi, afin de pouvoir tester la méthode de reconstruction 3D sur le Piton de la Fournaise, on contourne le problème du calcul de pose en se servant de balises au sol dont on mesure la position exacte. Ces balises permettent l'utilisation du processus de calibrage de la méthode de reconstruction multi-vues ordinairement utilisé en laboratoire. Plus de détails sur cette utilisation particulière du code de calibrage sont donnés plus loin (paragraphe 4.3.4).

Planification de la mission :

Les objectifs de la mission exposés ci-dessus et les conclusions issues de la mission de novembre 2000 permettent de planifier l'acquisition des données :

- Tout d'abord, le choix d'un avion de type CESSNA est apparu être une bonne solution en raison du coût du vol, environ 4 fois moindre que celui d'un hélicoptère, et de la configuration de l'avion, qui permet, grâce à ses ailes hautes, d'avoir un champ de vue important avec une prise de vues fenêtre ouverte. La vitesse de vol minimale est d'environ 60 à 80 km/h, ce qui permet une prise de vues suffisamment rapide et complète pour notre application.

- Ensuite, l'installation d'une cinquantaine de balises permettant le calcul de la position et de l'orientation des images est envisagée. Les balises correspondent à des carrés de tissu blanc de 1×1 m. La couleur et les dimensions des balises sont choisies de manière à ce que celles-ci soit aisément détectables dans les images monochromes capturées avec le Nikon D1 (résolution : 2000×1312 pixels). La répartition de ces balises est souhaitée la plus homogène possible sur le cône et leur nombre suffisamment grand pour que quatre balises au moins soient visibles dans chaque image.

- L'heure du vol doit d'abord être fonction des conditions météorologiques sur le volcan, sachant qu'en général des nuages et un brouillard dense apparaissent rapidement dans la matinée, mais doit aussi être fonction de la position du soleil afin de minimiser les ombres (position au zénith idéalement).

- Un certain nombre de contraintes permettent également la planification sommaire du survol du Piton de la Fournaise et de la prise de vues.

1. La première contrainte est le type de capteur utilisé. Celui-ci conditionne le champ de vue et la résolution du pixel possibles selon une distance de prise de vue donnée. Le Nikon D1 est utilisé avec un objectif 18 mm (grand angle), permettant d'avoir un champ de vue important, bien adapté à l'échelle du volcan étudié.

2. L'objectif initial étant de reconstruire la totalité du cône de manière précise (au moins métrique), la couverture de celui-ci doit être complète. Ceci constitue une seconde contrainte. La totalité du volcan peut être recouverte selon le mode d'acquisition proposé en laboratoire, c'est-à-dire une couronne à mi-hauteur du cône et une couronne « haute » pour couvrir plus complètement la zone sommitale. Cependant cette mission s'insère dans un projet de cartographie précise des fractures du sommet de l'édifice, et par conséquent une priorité est donnée à la reconstruction précise de la partie sommitale du Piton de la Fournaise. Or, à l'échelle du volcan, on se rend compte que la résolution du capteur n'est pas suffisante pour obtenir, selon le mode d'acquisition des vues classique du laboratoire (une couronne à mi-hauteur de l'objet et une couronne haute), une résolution du pixel satisfaisante permettant une reconstruction très fine du sommet. La résolution du pixel nécessaire à une reconstruction métrique du cône est de l'ordre du mètre selon les résultats de laboratoire (Tableau 2-3, chapitre 2), et si la précision souhaitée est plus grande (décimétrique), alors le pixel devra correspondre à quelques décimètres sur le terrain. Pour cette raison, on décide d'acquérir les vues sous forme de quatre couronnes autour de l'édifice, effectuées à des distances du cône et des altitudes différentes :

Les trois premières couronnes visent à couvrir la totalité du cône avec une résolution du pixel de quelques décimètres (de 0.3 m à 0.5 m au centre de l'image). La couronne 1 couvre la partie sommitale du cône, c'est à dire les cratères Bory et Dolomieu ainsi que le voisinage immédiat de ceux-ci. La deuxième couronne correspond à la moitié supérieure du cône et la troisième couronne à la moitié inférieure. Une quatrième couronne est effectuée de manière à couvrir à elle seule la totalité du cône pouvant servir à reconstruire le cône de manière plus grossière. La Figure 4-3 schématise les différentes couronnes planifiées. Les altitudes, distances et nombre de vues sont donc déterminées en fonction du champ de vue souhaité (partie du cône à couvrir), de la résolution du pixel désirée (inférieure à 0.5 m pour les couronnes 1 à 3 et inférieure à 1 m. pour la couronne 4), et du

recouvrement des vues pour chaque couronne (50% de recouvrement). Un nombre de vues minimum pour chaque couronne est estimé (Figure 4-3), mais en pratique, on envisage de prendre un maximum de vues pour chaque couronne, le plus régulièrement possible, afin de s'assurer un recouvrement important entre les vues. On remarque que les altitudes de prises de vue envisagées sont relativement hautes (supérieures au sommet du cône dans chaque cas). Celles-ci sont contraintes par une volonté de minimiser les variations de résolution du pixel au sein d'une même image en faisant en sorte que l'axe optique soit proche de l'orthogonalité avec la surface photographiée. Les flancs du volcan étant de faible pente, cela implique une inclinaison importante de l'appareil photographique.

3. Enfin, l'acquisition de quelques vues éloignées du cône est envisagée (latérales et au dessus du cône). Ces vues permettront d'avoir une vue d'ensemble du cône au sein de l'Enclos et pourront servir à l'initialisation d'un modèle 3D.

- L'embarquement d'un GPS différentiel dans l'avion est également prévu. Ainsi, le trajet du vol sera enregistré et une synchronisation manuelle avec l'appareil photographique permettra de disposer de la position de chaque image. On pourra ainsi comparer les positions calculées et celles mesurées. Ces données peuvent également servir dans l'avenir au développement d'un outil de calibrage adapté à l'utilisation de la méthode de reconstruction multi-vues au terrain combinant des informations 3D et 2D par exemple.

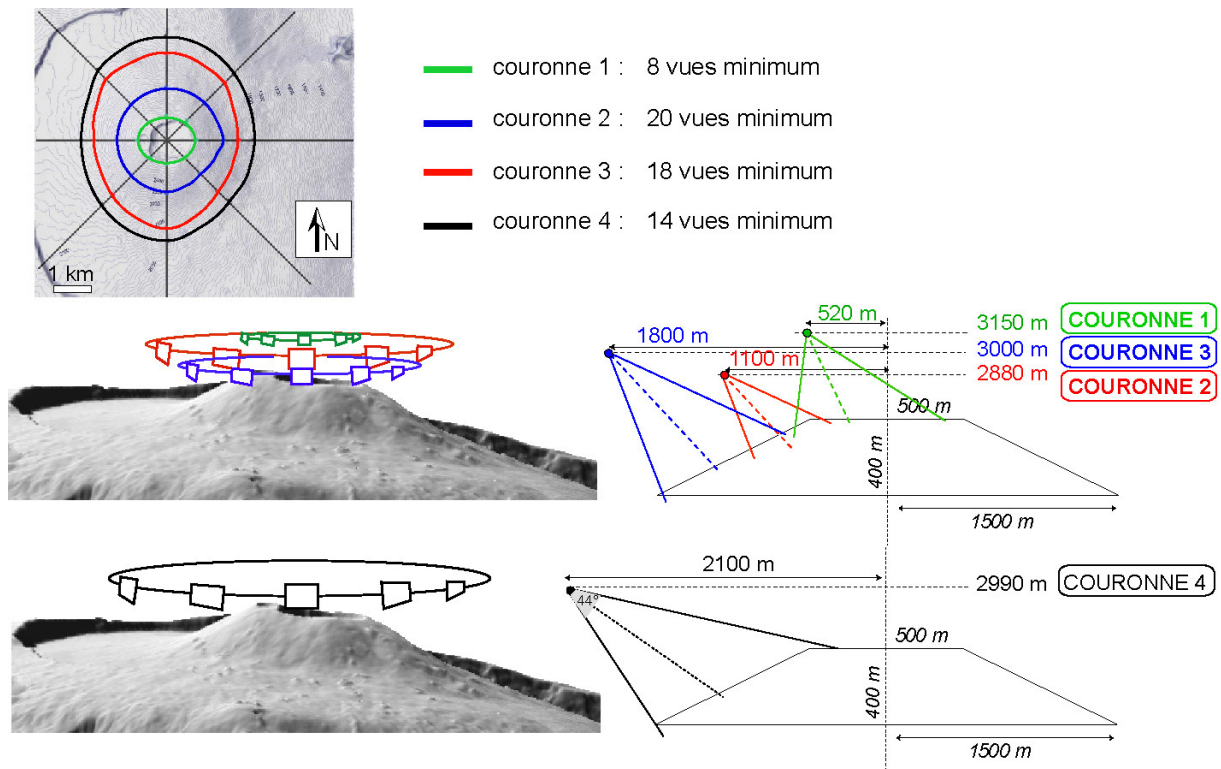


FIGURE 4-3 : PLAN DE VOL SOMMAIRE POUR L'ACQUISITION DES VUES AUTOUR DU PITON DE LA FOURNAISE. QUATRE COURONNES SONT PRÉVUES, CHACUNE À DES ALTITUDES ET DISTANCES DIFFÉRENTES. EN HAUT : CARTE TOPOGRAPHIQUE ET TRAJECTOIRE APPROXIMATIVE DES COURONNES. LE NOMBRE DE VUES MINIMUM PAR COURONNE EST INDIQUÉ. EN BAS : SCHÉMAS DE PROFIL DES 4 COURONNES.

4.3.3 DONNÉES ACQUISES

Les Balises au sol

Au total 72 balises ont été positionnées sur le cône central, en combinaison avec la mission de Polarisation Spontanée menée par Philippe Labazuy (Laboratoire Magmas et volcans, Université Clermont-Ferrand). Ces balises ont été mesurées grâce à un GPS différentiel (modèle : Ashtec Xtrem Summit), et les données ont été traitées avec le logiciel WINPRISM (Ashtec). Le temps de chaque mesure est compris entre 30 secondes et une minute. La précision possible avec ce type d'appareil et ce temps d'acquisition est de l'ordre du cm en X et Y, et de quelques cm en Z. Cependant cela ne représente pas la précision réelle de la position des balises. En effet, ces balises sont, pour rappel, des carrés de tissu blanc positionnés à même le sol. Lors d'une mesure, l'antenne GPS est placée au centre de la balise estimé visuellement. La verticalité de l'antenne est également ajustée manuellement par l'opérateur. Ainsi, en prenant en compte le mode d'acquisition des données et la précision théorique donnée par le GPS, on peut estimer que la précision de positionnement des balises est d'une dizaine de cm.

La Figure 4-4 représente le MNT (25 m) du cône central avec la position des 72 balises. On observe que la densité des balises est moins importante sur le flanc Est du volcan, ceci en raison des difficultés d'accès au flanc rencontrées lors de la mission.

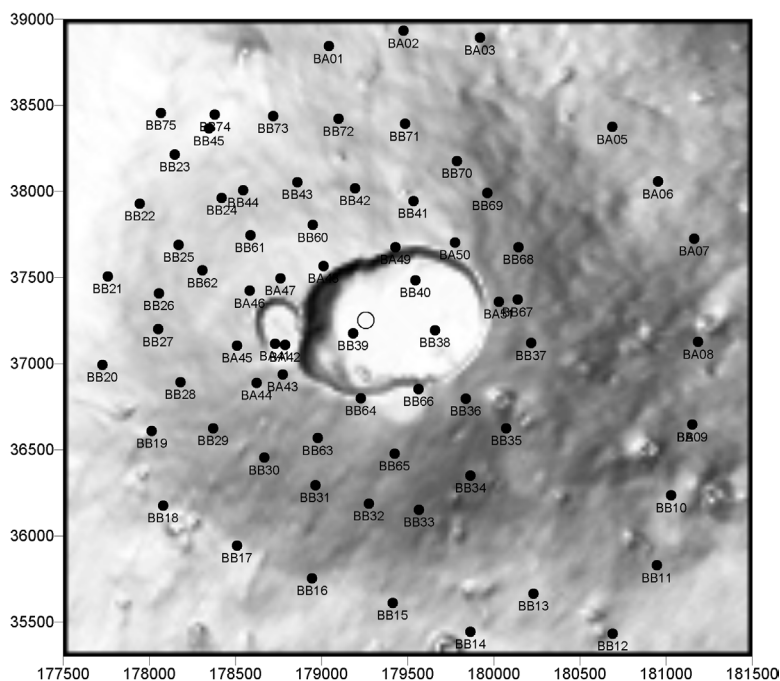


FIGURE 4-4 : POSITIONS DES 72 BALISES SUR LE CÔNE CENTRAL (MNT AU 25 M). LE BARYCENTRE DES BALISES EST SYMBOLISÉ PAR UN CERCLE VIDE (CENTRE DOLOMIEU / BORY).

Les vues

Un avion de tourisme de type CESSNA 4 places a été employé. Deux vols ont été effectués sur le volcan. Le premier a permis l'acquisition d'une centaine d'images qui ne sont malheureusement pas

exploitables car les conditions météorologiques se sont rapidement dégradées lors du vol et le cône est en partie masqué par les nuages dans la grande majorité des images. Ce premier vol a cependant permis de tester le plan de vol initial et de l'ajuster pour un second essai (vitesse du vol, distance de prise de vues etc.).

Lors du 2^{ième} vol, un peu plus de 130 images ont été acquises selon les quatre couronnes et les quelques vues éloignées envisagées. Le tableau X résume les principales données relatives à chaque couronne.

Couronne	Champ de vue	Nombre de vues	Distance moyenne horizontale e* (m)	Altitude moyenne (m)	Distance planifiée horizontale e * (m)	Altitude planifiée (m)
1	Partie sommitale	19	770	3170	520	3150
2	Partie supérieure des flancs	25	1110	2890	1100	2880
3	Partie supérieure et inférieure	29	1760	3020	1800	3000
4	Totalité du cône	28	2470	3030	2100	2990
Vues éloignées	Cône + Enclos (de profil + de dessus)	29 (18+11)	4000	3020	-	-

* La distance moyenne est donnée relativement au barycentre des balises et la distance planifiée par rapport au centre de l'ensemble des cratères Bory et Dolomieu constituant la zone sommitale. Ce dernier se confond pratiquement avec le barycentre des balises.

TABLEAU 4-1 : PRINCIPALES DONNÉES D'ACQUISITIONS DES VUES AUTOUR DU PITON DE LA FOURNAISE AU COURS DU DEUXIÈME VOL. LES DISTANCES ET ALTITUDES MOYENNES DE PRISE DE VUES SONT DONNÉES PAR LES MESURES GPS ACQUISES DANS L'AVION (VOIR PLUS LOIN DANS LE TEXTE). 134 IMAGES AU TOTAL ONT ÉTÉ ACQUISES (LE TABLEAU EN PRÉSENTE 130).

Les consignes de vol et d'acquisition (Tableau 4-1) ont été relativement bien respectées fournissant ainsi des données de qualité. Les quelques problèmes relatifs à l'acquisition sont les suivants : (1) La couronne 3 ne couvre pas toute la partie inférieure du cône (base du cône manquante), (2) les vues de la couronne 4, de la couronne 3 et les vues éloignées hautes acquises tardivement sont affectées par la présence de nuages, (3) une partie de l'avion est visible en bas de chacune des images des trois premières couronnes, et (4) les ombres sont relativement importantes car le vol a été effectué tôt le matin afin d'éviter la présence de nuages sur le site.

Un exemple de deux vues consécutives pour chaque couronne est donné dans la Figure 4-5 et la position des différentes images est indiquée sur la Figure 4-6.

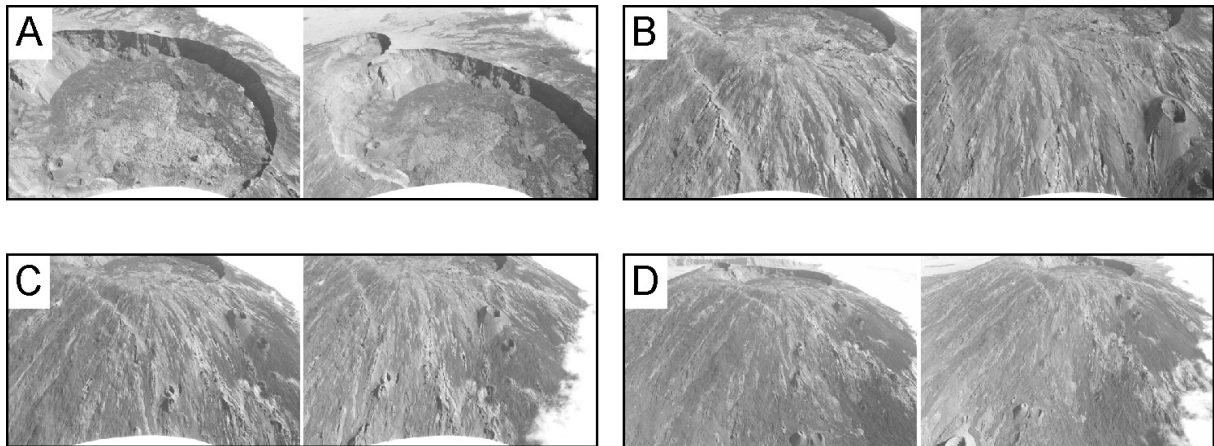


FIGURE 4-5 : EXEMPLE DE DEUX VUES CONSÉCUTIVES (VOL 2) POUR CHAQUE COURONNE EFFECTUÉE AUTOUR DU PITON DE LA FOURNAISE. A : COURONNE 1 : PARTIE SOMMITALE DU CÔNE. B : COURONNE 2 : PARTIE SUPÉRIEURE DU CÔNE. C : COURONNE 3 : PARTIE SUPÉRIEURE ET INFÉRIEURE DU CÔNE (BASE MANQUANTE). LA COUVERTURE INITIALE PRÉVUE CORRESPONDAIT À LA PARTIE INFÉRIEURE SEULE DU CÔNE. D : COURONNE 4 : TOTALITÉ DU CÔNE. E : EXEMPLE DE VUES ÉLOIGNÉES.

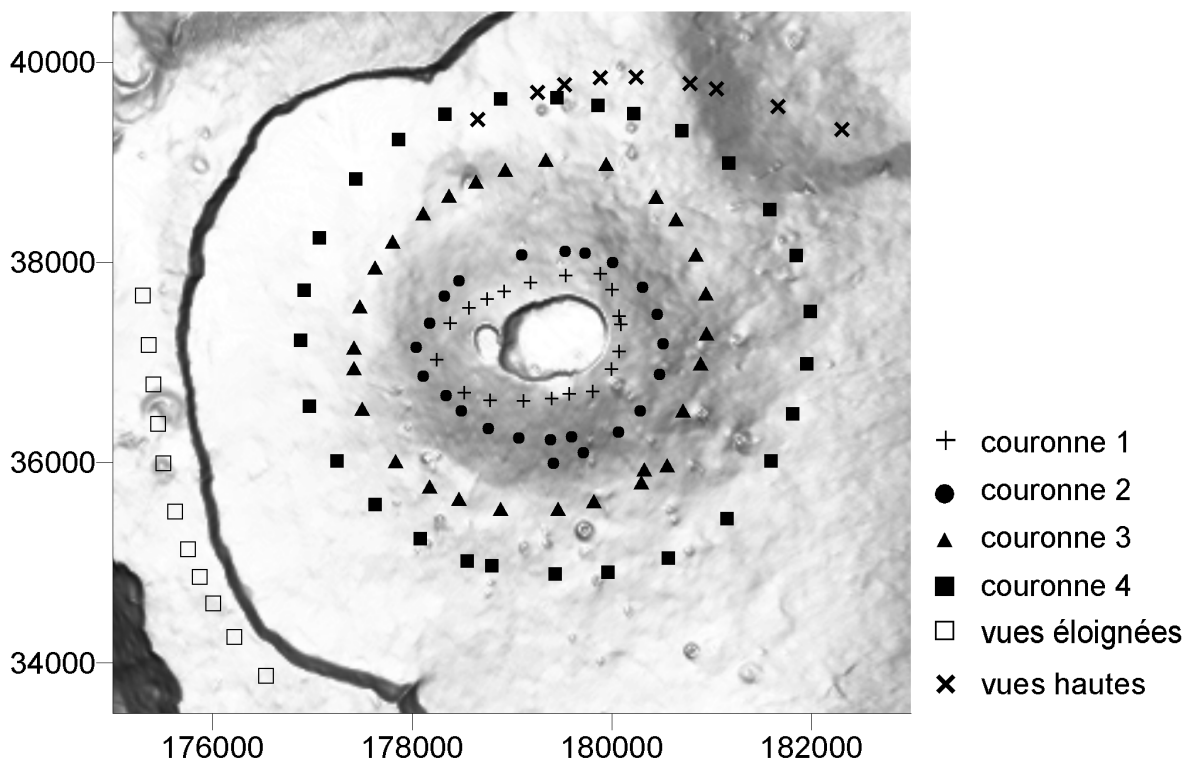


FIGURE 4-6 : POSITIONNEMENT DES VUES SUR LE MNT (25M) DU PITON DE LA FOURNAISE. LES POSITIONS SONT DONNÉES PAR LES MESURES GPS ASSOCIÉES À CHAQUE VUE. SEULES LES VUES CORRESPONDANT PARFAITEMENT AUX COURONNES SONT POSITIONNÉES. UNE PARTIE DES VUES ÉLOIGNÉES N'EST PAS REPRÉSENTÉE EN RAISON D'UNE ABSENCE DES INFORMATIONS GPS CORRESPONDANTES.

Les données GPS de l'avion

La base mobile et l'antenne d'un GPS différentiel de même type que pour les mesures des balises est embarqué dans l'avion au cours des deux vols. Les données sont traitées avec le même logiciel que celui cité précédemment. Le GPS est préalablement synchronisé manuellement (à la seconde) avec l'appareil photo pour permettre de retrouver la position d'une image à un temps donné. L'enregistrement GPS débute au départ de l'avion, permettant ainsi la stabilisation de l'enregistrement et le traçage du vol (Figure 4-7). Le capteur et le GPS ne sont pas physiquement associés et calibrés. Ainsi, la position du capteur est confondue avec la position de l'avion et correspond donc à une position approximative de l'appareil photo. Contrairement aux positions des balises au sol, acquises sur une durée de 30 à 60 secondes pour chaque balise, une seule mesure correspond à chaque image en vol. Cela réduit considérablement la précision théorique du GPS pour chaque point, ce qui n'est cependant pas un inconvénient étant donné que la position recherchée du capteur est approximative. Le décalage possible inférieur à une seconde (synchronisation manuelle) entre les horloges du GPS et du capteur est également de second ordre. Ainsi, la précision de la position de chaque image pourrait être estimée à quelques mètres si un autre problème concernant la synchronisation des vues n'était pas apparu. En effet, la confrontation des vues avec les données GPS indique un décalage entre les deux horloges de plusieurs dizaines de secondes. Sachant que l'avion réalise le trajet de la couronne 1 en 2.5 minutes, on a une idée de l'erreur engendrée par un tel décalage (plusieurs centaines de mètres). Afin d'exploiter néanmoins les données (pour la visualisation des images dans l'espace par exemple), on effectue une correction des données GPS en estimant le décalage horaire d'après le champ de vue de quelques images. Le décalage est estimé être de 44 ou 45 secondes. Une précision de la position de chaque image est alors délicate à estimer suite à cette correction ; Si la correction est exacte, alors une précision de quelques mètres reste valable pour chaque image.

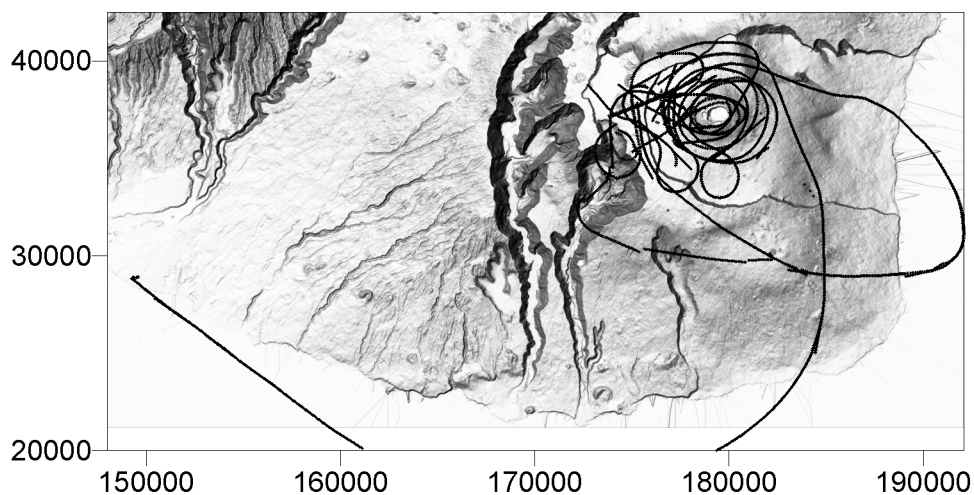


FIGURE 4-7 : TRAJET DU SECOND VOL DE LA MISSION SUR LE PITON DE LA FOURNAISE (AVRIL 2002) ENREGISTRÉ PAR GPS DIFFÉRENTIEL. LE DÉPART S'EFFECTUE SUR LA CÔTE SE DE L'ÎLE.

4.3.4 RÉSULTATS

Seule une partie des données de cette mission a été traitée au cours de la thèse. En effet, les expériences en laboratoire (chapitre 3) ont été menées simultanément au projet d'application de la méthode sur le terrain, et ont constituées une priorité pour la validation de la méthode. Ainsi, quelques tests de reconstruction ont été tentés sur le cône entier, puis sur la partie sommitale du cône qui représentait un intérêt particulier dans le cadre du projet de cartographie des fractures du Piton de la Fournaise (Projet CATNAT).

4.3.4.1 Calibrage du capteur

Comme il a été annoncé dans les objectifs de la mission (paragraphe 4.3.2.2), le processus de calibrage utilisé en laboratoire est également utilisé dans le cadre de cette mission. Cela est possible grâce au positionnement de balises sur le cône dont on mesure la position exacte par GPS différentiel. Le code est alors suffisamment souple pour permettre de calibrer le capteur dans une configuration qui n'est pas habituelle à son utilisation : il est en effet possible de choisir quels sont les paramètres que l'on souhaite optimiser. Ainsi, seuls les paramètres externes du capteur seront estimés dans le cas de cette application terrain. Les paramètres internes utilisés lors de ce calibrage ont été calculés préalablement en laboratoire pour une optique et une mise au point identiques à celles utilisées lors de l'acquisition, et la position de balises au sol est considérée comme étant exacte (Figure 4-8).

La détection automatique des taches en laboratoire n'est évidemment pas possible pour les balises sur le terrain, dont la reconnaissance dans l'image doit s'effectuer manuellement. Ceci constitue une tâche fastidieuse compte tenu du nombre d'images acquises. Un exemple de balise dans l'image est présenté Figure 4-9.

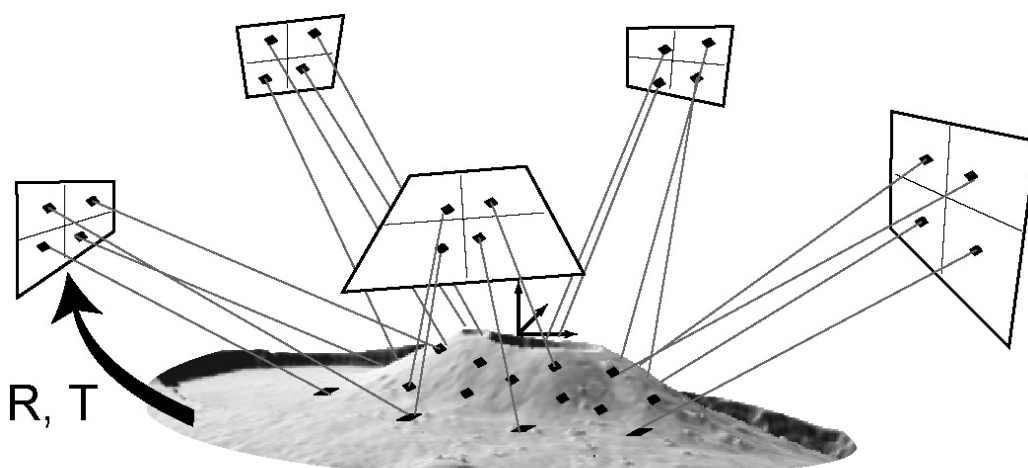


FIGURE 4-8 : SCHÉMATISATION DU CALIBRAGE EFFECTUÉ SUR LE PITON DE LA FOURNAISE.

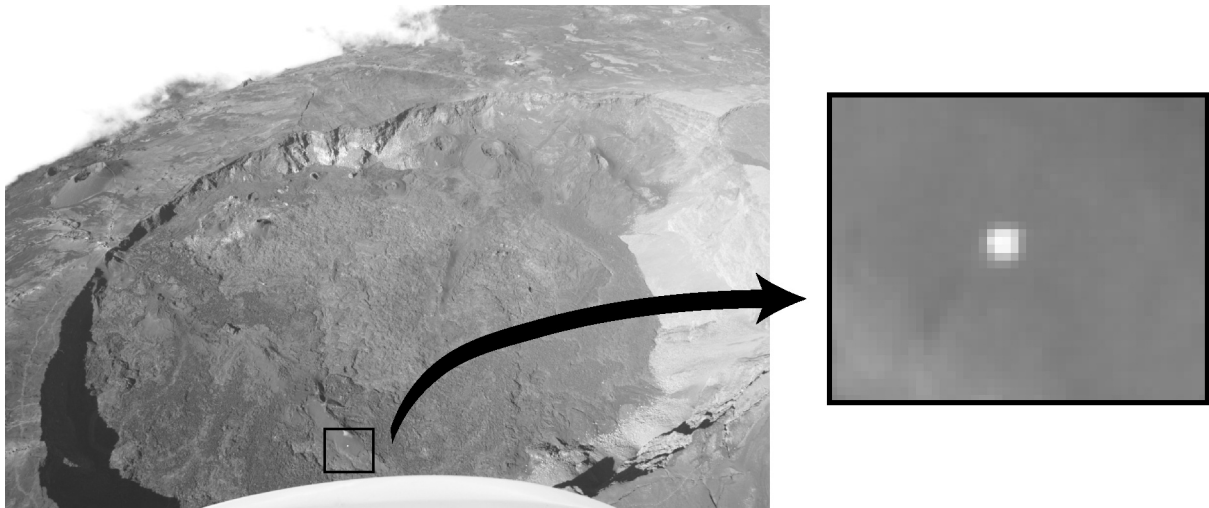


FIGURE 4-9 : UNE IMAGE DE LA COURONNE 1 ET UN DÉTAIL DE L'IMAGE REPRÉSENTANT UNE BALISE SERVANT AU POSITIONNEMENT ET À L'ORIENTATION DU CAPTEUR.

En théorie, quatre points non coplanaires dans chaque image suffisent à estimer une position et une orientation initiale du capteur (Lavest et al., 1998, DeMenthon et al., 1995). En pratique, on observe qu'un minimum de 6 balises doit être visible dans chaque image pour un succès du calibrage. Certaines images ne répondent pas à ce critère ou possèdent un nombre limite de points présentant une configuration particulière (points alignés par exemple). Ces images ne sont alors pas calibrées et ne serviront pas à la reconstruction 3D. Le repère objet utilisé pour calculer et exprimer la géométrie des vues est le repère WGS84 (World Geodetic System 1984) auquel on fait subir une translation de manière à ce que l'origine corresponde au barycentre des balises. On peut alors travailler dans un repère local simple pour le calibrage et la reconstruction.

Le nombre de vues calibrées par couronne est donné dans le Tableau 4-2. Au total 104 vues sur 119 sont calibrées (on ne considère pas les vues éloignées hautes en raison de la présence de nuages occultant la presque totalité du cône). On observe que même pour les vues les plus éloignées, le calcul de pose est possible à partir de la reconnaissance de balises de dimension pourtant inférieure au pixel. En effet, les vues éloignées latérales sont prises à environ 4 km du centre du volcan, ce qui implique une résolution du pixel dans l'image d'environ 2.5 m (focale de 1600 pixels environ pour une résolution de l'image de 2000×1312), or les balises font 1×1 m. Cela montre qu'une information plus petite que le pixel est enregistrée. Dans ce cas précis, cet enregistrement est certainement possible en raison du signal particulier émis par les balises, qui se distinguent fortement, de part leur blancheur, de la surface naturelle. On note que cette information peut être exploitée dans notre code car la mesure effectuée est sub-pixellaire.

Couronne	Nombre de vues calibrées
1	19
2	16
3	28

4	26
Vues éloignées (vues latérales)	15

TABLEAU 4-2 : LES DIFFÉRENTES COURONNES DU VOL 2 DE LA MISSION SUR LE PITON DE LA FOURNAISE (AVRIL 2002) ET LE NOMBRE DE VUES CALBRÉES POUR CHACUNE. CES VUES PEUVENT ÊTRE UTILISÉES POUR LA RECONSTRUCTION DU CÔNE.

4.3.4.2 Résultats de reconstruction 3D

Reconstruction du cône central

Une première tentative de reconstruction est effectuée sur la totalité du cône. L'initialisation du modèle 3D se fait de la même manière qu'en laboratoire, à partir d'une des vues éloignées du cône central. Cependant le modèle, enregistré dans un fichier où figure la position des points 3D, est modifié manuellement afin d'intégrer les données topographiques disponibles du MNT au 25 m (repérage de points sur le MNT dont les positions sont relevées et attribuées aux 25 points du modèle 3D initial). La Figure 4-10 montre des exemples de vues avec le modèle 3D initial projeté. On observe que celui-ci est très grossier, ce qui laisse penser que, selon le type de vues utilisé pour la reconstruction, les conditions initiales peuvent être trop éloignées de la réalité pour une bonne convergence du système.

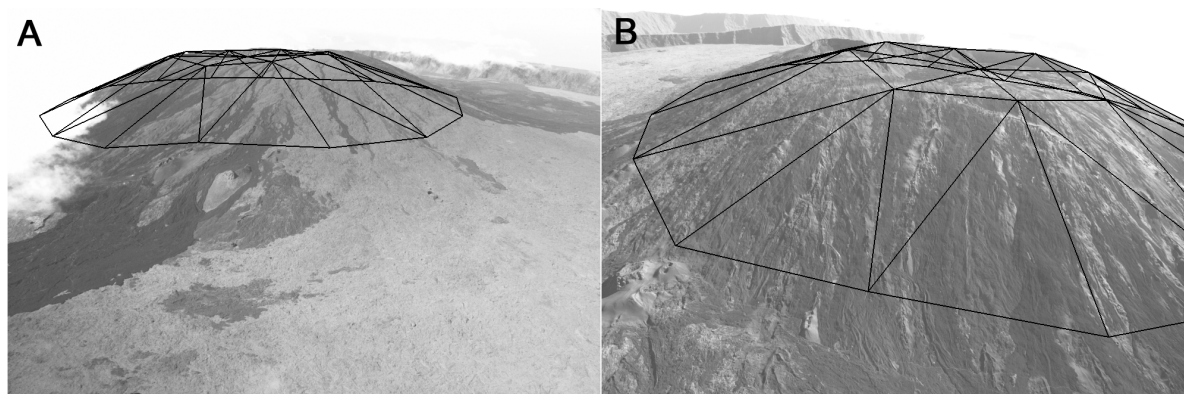
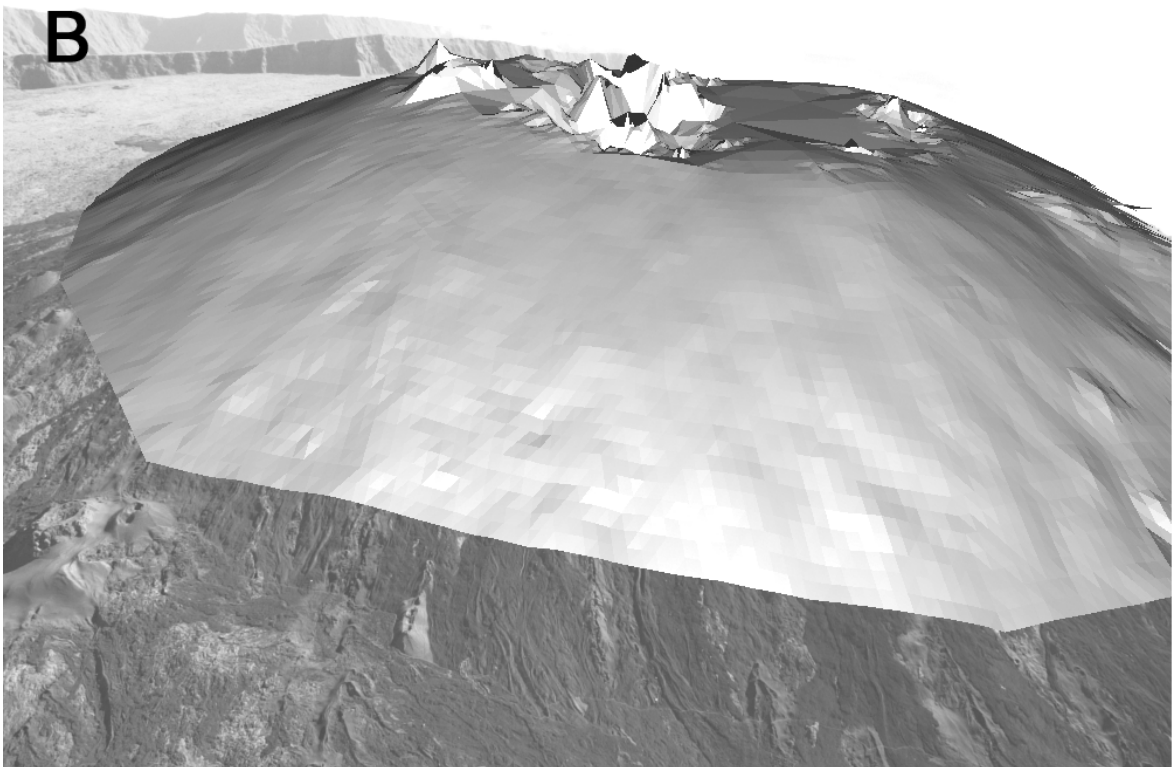
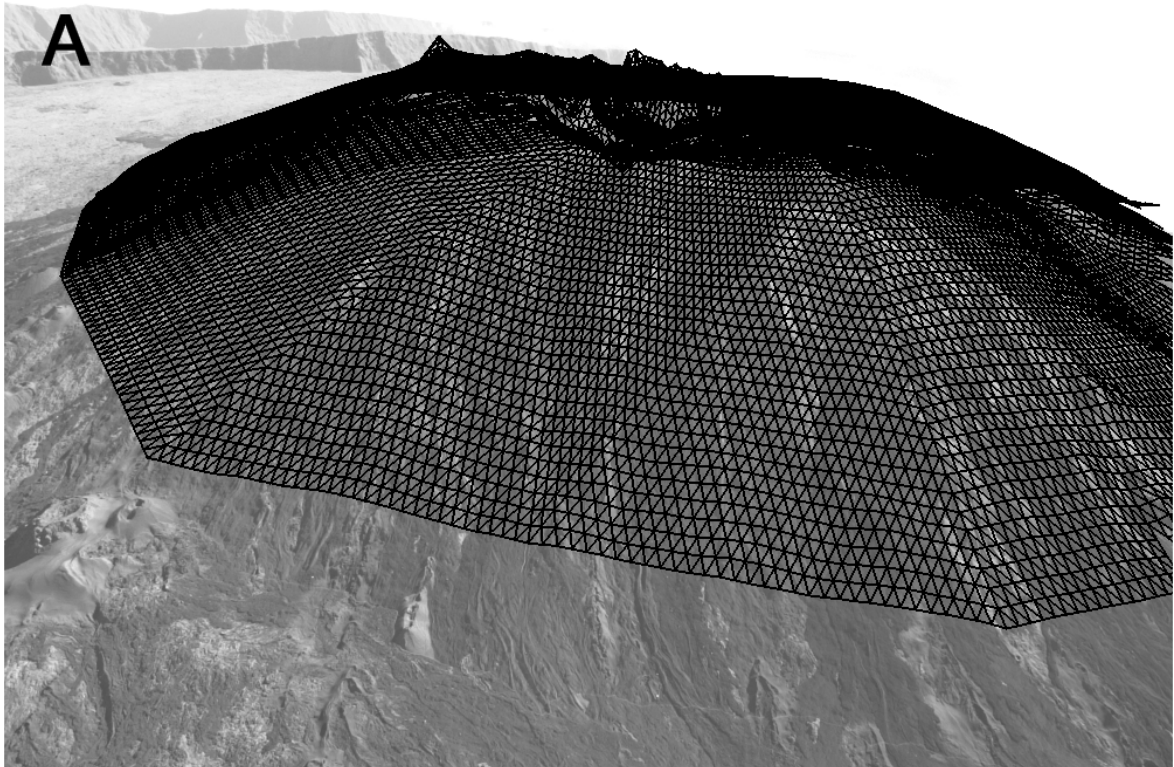


FIGURE 4-10 : EXEMPLE D'UNE VUE ÉLOIGNÉE (A) ET D'UNE VUE DE LA COURONNE 4 (B) AVEC LE MODÈLE 3D INITIAL DU CÔNE ENTIER PROJETÉ.

Les vues utilisées pour la reconstruction de la totalité du cône sont celles de la couronne 4, seule couronne permettant de couvrir toute la surface de l'édifice. Au total, 26 images calibrées sont disponibles (Tableau 4-2) pour la reconstruction.

Les résultats de reconstruction obtenus ne sont pas réellement satisfaisants. On observe également que la convergence lors de l'optimisation est longue (plus de 2h30), traduisant une difficulté du système à converger. Des perturbations apparaissent dès les résolutions les plus basses du modèles (R=1 et R=2). La Figure 4-11 montre le modèle reconstruit final obtenu. Ces perturbations sont localisées au sommet et à la base du flanc Est de l'édifice. Elles s'expliquent assez aisément : (1) le sommet du cône est mal couvert par les vues de la couronne 4. La pauvreté d'information concernant

cette région entraîne alors un échec de la mise en correspondance, le modèle initial étant très éloigné de la réalité dans cette zone. On voit sur la Figure 4-11 de nombreux pics au sommet du cône ainsi que des zones non optimisées correspondant à des facettes pour lesquelles aucun couple de vues n'a pu être utilisé pour la mise en correspondance. (2) la couverture nuageuse présente à la base du flanc Est du volcan constitue un deuxième écueil pour la présente reconstruction. 12 vues parmi les 26 utilisées sont affectées par ces nuages. Ils apparaissent dans l'image sous forme de zones homogènes blanches qui rendent impossible la mise en correspondance des facettes relatives à cette partie du cône.



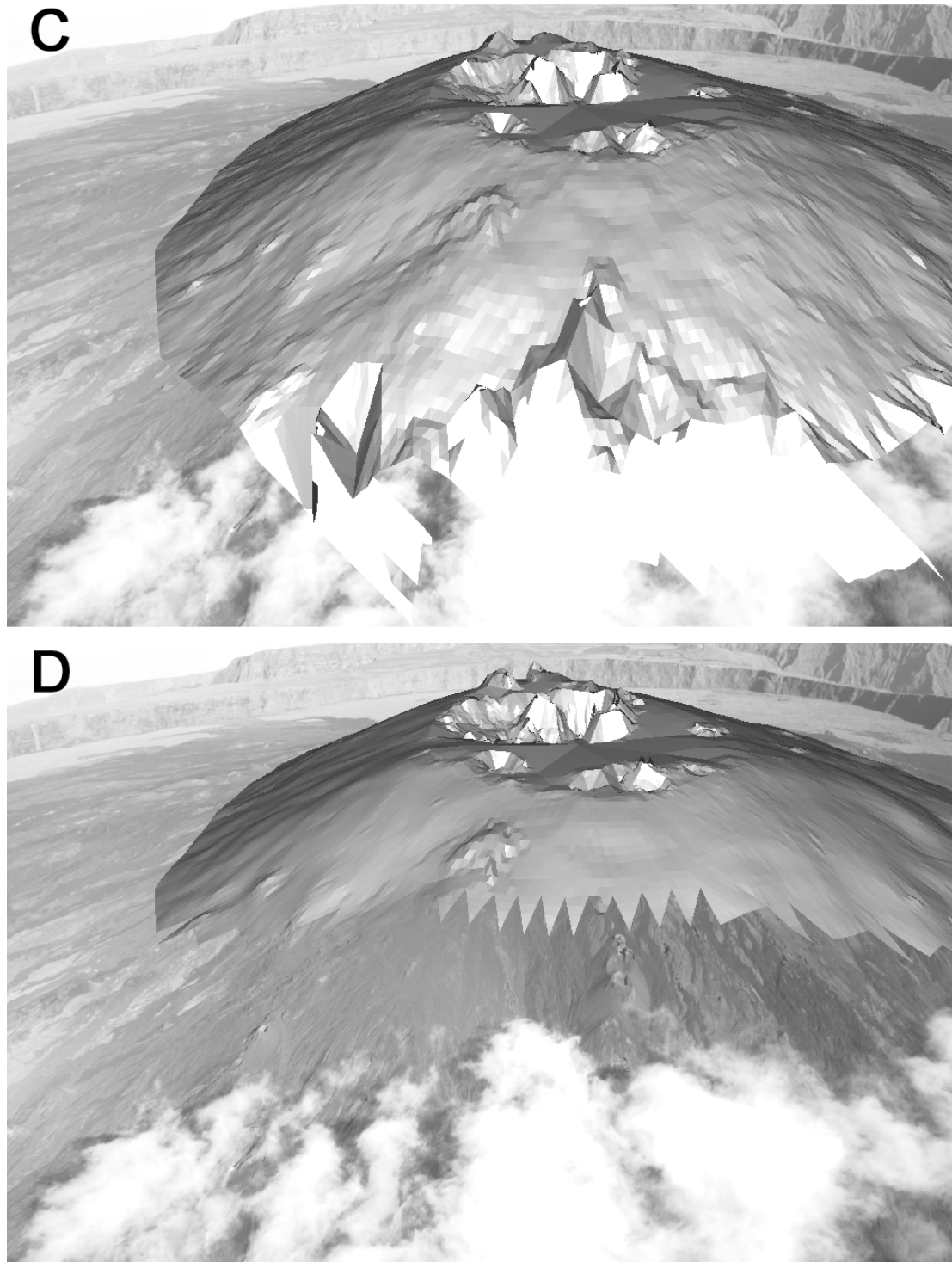


FIGURE 4-11 : RECONSTRUCTION FINALE DU CÔNE CENTRAL. LA RÉOLUTION DU MODÈLE EST DE $R = 6$ (32768 TRIANGLES ET 16641 POINTS). D'IMPORTANTES PERTURBATIONS SONT PRÉSENTES AU SOMMET ET À LA BASE DU CÔNE. A : MODÈLE FILAIRE. B : VUE SUD DU MODÈLE OMBRÉ. C : VUE EST DU MODÈLE OMBRÉ. D : MODÈLE 3D PARTIEL : UN SOUS-MODÈLE A ÉTÉ CRÉÉ À PARTIR DU MODÈLE 3D INITIAL DU CÔNE ENTIER (FIGURE X : MODÈLE 3D INITIAL) AFIN DE NE PAS CONSIDÉRER LA ZONE CACHÉE PAR LES NUAGES. LES IMAGES A ET B CORRESPONDENT ÉGALEMENT À CE SOUS-MODÈLE.

On observe enfin que, outre les perturbation à la base et au sommet du cône, la reconstruction des flancs est plutôt encourageante (Figure 4-11B). Cependant, on s'aperçoit enfin qu'à cette échelle, la résolution la plus haute ($R = 6$) est insuffisante à reconstruire finement le cône. En effet, à $R = 6$, chaque facette correspond approximativement à 240 m^2 (triangles équilatéraux d'environ 20 m. de côté), ce qui est trop grossier pour détecter les figures caractéristiques du cône (coulées de lave, cônes éruptifs etc.). Il faut de plus souligner que les deux dernières optimisations du modèle ($R=5$ et $R=6$) sont effectuées selon le critère « Point » (chapitre 2 paragraphe 2.3.3.4) utilisé normalement pour un affinage de la reconstruction. Or à la résolution précédente ($R = 4$), chaque facette représente environ 3500 m^2 (triangles équilatéraux d'environ 80 m. de côté), et un affinage de la reconstruction est loin d'être satisfaisant. Une optimisation à des résolutions plus importantes serait nécessaire (maillage plus fin). Cependant, on voit quand même que la reconstruction des flancs du cône

Reconstruction partielle du cratère Dolomieu

Une deuxième tentative de reconstruction a été réalisée à plus petite échelle. Il s'agit de la reconstruction partielle du cratère Dolomieu. Cette reconstruction utilise les 19 images de la couronne 1 couvrant la partie sommitale du cône.

Initialement, la reconstruction de la totalité de la partie sommitale du Piton de la Fournaise était envisagée. Cependant, quelques tests de reconstruction utilisant le modèle 3D initial du cône entier (Figure 4-10) ont abouti à un échec. La principale raison de l'échec semble être l'éloignement trop important des conditions pour une bonne convergence du système initiales (modèle grossier avec 8 facettes représentant la partie sommitale du cône). Nous avons alors choisi de ne considérer dans un premier temps qu'une partie du sommet pour tester la méthode, en l'occurrence une zone où l'initialisation simple et rapide d'un modèle 3D peut être réalisée : le fond du cratère Dolomieu.

Seule une partie du cratère est reconstruite car là encore, quelques tests de reconstruction sur la totalité du fond du cratère se sont révélés être insatisfaisants. De fortes perturbations sont en effet apparues en bordure du modèle, celui-ci correspondant initialement à un plan suivant approximativement les parois du cratère (Figure 4-12). Ces perturbations sont liées à la présence dans toutes les images de la couronne 1 d'une zone occultée par une partie de l'avion. La partie du cône occultée varie d'une image à l'autre en raison du déplacement associé du capteur et de l'avion. Le bas de chaque image présente une zone blanche homogène relativement importante (Figure 4-12) qui perturbe la mise en correspondance des facettes du modèle se projetant dans cette zone. Etant donné la géométrie des vues autour du cône et le modèle initial choisi (Figure 4-12), les perturbations concernent toute la bordure du modèle.

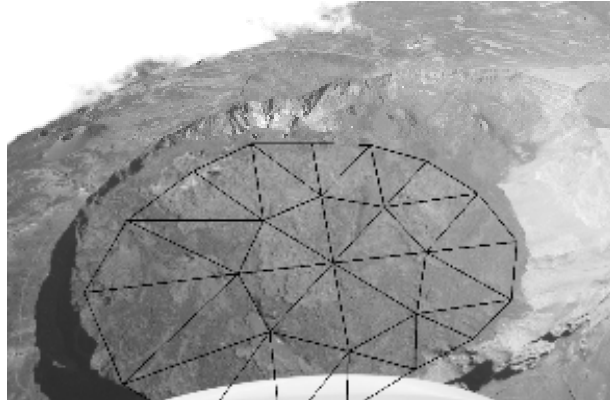


FIGURE 4-12 : UNE VUE DE LA COURONNE 1 ET LE MODÈLE INITIAL DE LA TOTALITÉ DU FOND DU CRATÈRE DOLOMIEU.

Ainsi, seule une partie du Dolomieu est reconstruite, à partir du modèle initial présenté Figure 4-13. Ce dernier correspond à un plan horizontal situé à 2400 m. d'altitude, issu de l'initialisation d'un cône à partir d'une image ensuite modifié manuellement (sous forme de fichier) afin que tous les points soient à la même altitude.

Le résultat de la reconstruction partielle du Dolomieu est présenté dans la Figure 4-14.

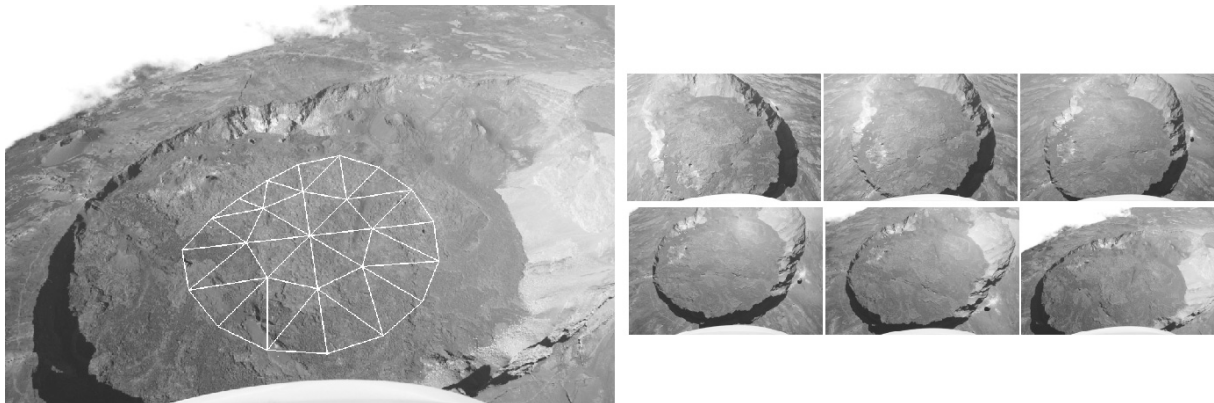


FIGURE 4-13 : MODÈLE INITIAL ET EXEMPLES DE VUES DE LA COURONNE 1 UTILISÉS POUR LA RECONSTRUCTION PARTIELLE DU CRATÈRE DOLOMIEU.

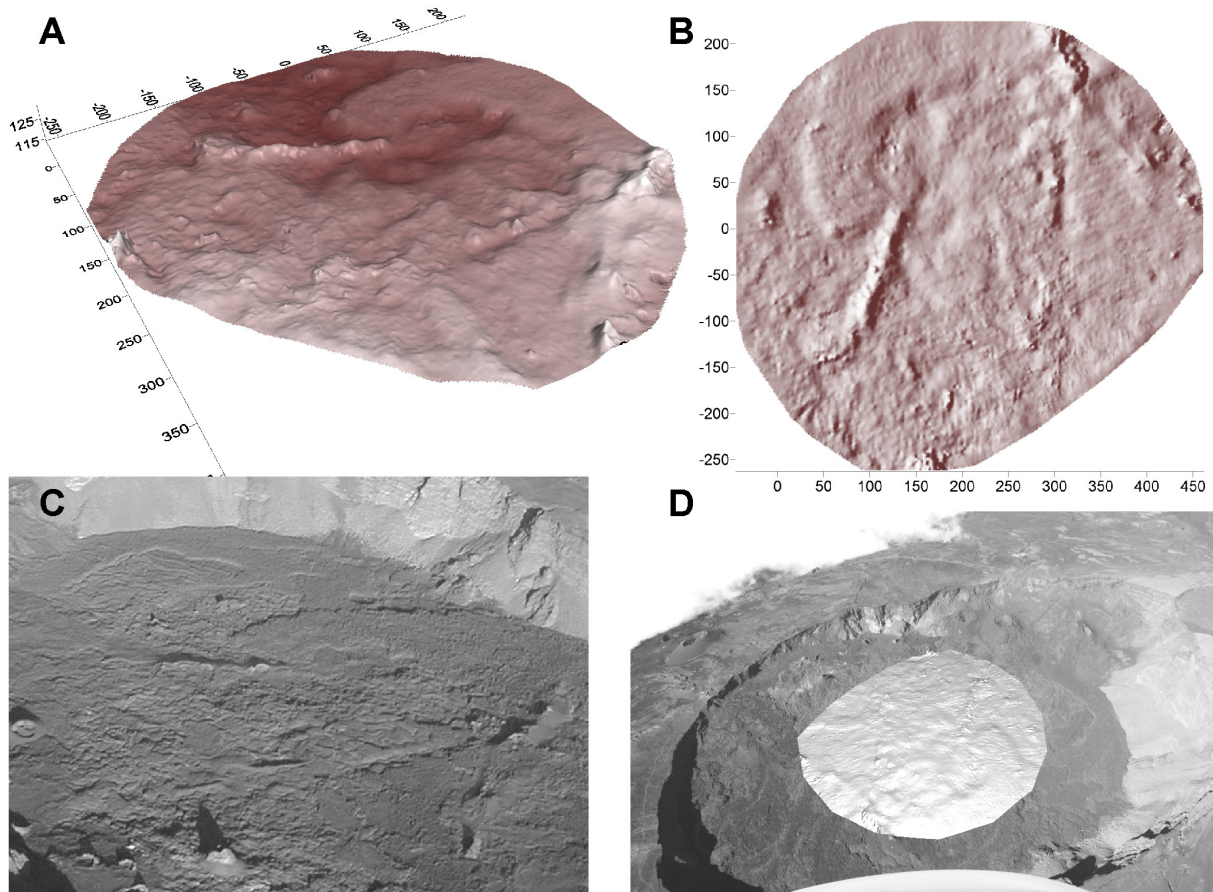


FIGURE 4-14 : RÉSULTATS DE LA RECONSTRUCTION PARTIELLE DU DOLOMIEU. A : MNT EN PLAN. B : VUE 3D DU MNT. LE MNT PRÉSENTÉ EST ISSU D'UNE INTERPOLATION DE LA RECONSTRUCTION FINALE RÉALISÉE SOUS SURFER (MÉTHODE DE KRIGEAGE, DÉCRITE DANS *Journal and Huijbregts, 1978*). LE PAS DE LA GRILLE EST DE 1 M. IL EST REPRÉSENTÉ DANS UN REPÈRE LOCAL GÉORÉFÉRENCÉ (REPÈRE WGS84 AVEC L'ORIGINE RAMENÉE AU BARYCENTRE DES BALISES). C : UNE VUE DE LA COURONNE 1 ET LE MODÈLE RECONSTRUIT PROJETÉ (RÉSOLUTION = 6, SOIT PLUS DE 30000 FACETTES ET 16000 POINTS). D : VUE DE LA MISSION DE NOVEMBRE 2000 CORRESPONDANT À LA ZONE RECONSTRuite. L'ÉCLAIREMENT RASANT PERMET D'IDENTIFIER PLUS CLAIREMENT LES STRUCTURES RECONSTRUITES QU'EN UTILISANT LES VUES DE LA COURONNE 1.

Le modèle reconstruit s'inscrit dans une zone de 500×500 m environ. La reconstruction finale comporte plus de 30000 facettes et 16000 points (Résolution = 6), chaque facette faisant en moyenne 15 pixels^2 . La répartition spatiale des points 3D indique que les points sont espacés en moyenne de 3m selon (XY), et que la hauteur totale du modèle est d'environ 18 m. En théorie, la précision de reconstruction attendue devrait être au moins de 0.4 m à cette échelle d'observation. En effet, les résultats de laboratoire indiquent une précision d'au moins 6.10^{-4} m pour une distance caméra / objet de 1m, soit 0.4 m pour une distance de 770 m (Tableau 4-1) si on fait le rapport d'échelle. Cependant il est difficile de vérifier cette précision de reconstruction sans une vérité terrain. Lorsque l'on compare visuellement la reconstruction avec les images disponibles, on observe des structures cohérentes. Des fissures éruptives, des coulées de lave et de petits cônes éruptifs se distinguent

clairement sur le MNT et sont identifiables sur les images (Figure 4-14A, B et C). Localement, de petits pics à la surface du MNT apparaissent et ne sont pas reconnaissables sur le terrain. Ils correspondent probablement à des erreurs de reconstruction. Quelques données GPS issues de la mission de Polarisation Spontanée (PS) réalisée au même moment que l'acquisition des vues sont également disponibles. Elles nous permettent d'avoir une idée de la précision de reconstruction obtenue. Ces données sont acquises selon des trajectoires linéaires, en vue de l'établissement de profils PS (Figure 4-15). La précision des points en Z, malgré l'utilisation d'un GPS différentiel, n'est pas de quelques centimètres, mais pluridécimétrique en raison des conditions d'acquisition des données (terrain accidenté et antenne GPS portée dans un sac à dos). On estime en moyenne que la précision des points est de l'ordre de 0.2 m., avec des variations possibles d'un ordre de grandeur supérieur. On effectue la comparaison des altitudes entre ces points et les points équivalents de la reconstruction 3D. Le tableau suivant indique quelques données statistiques sur ces variations :

	Variations réelles en Z (m.)	Variations absolues en Z (m.)
Minimum	-6.951	0.008
Maximum	5.999	6.951
Médiane	-0.590	1.279
Moyenne	-0.128	1.696
Mode	-0,598	0,598

TABLEAU 4-3 : COMPARAISON ENTRE DES MESURES GPS ET LES DONNÉES DE LA RECONSTRUCTION PARTIELLE DU DOLOMIEU POUR 161 POINTS : QUELQUES DONNÉES STATISTIQUES CONCERNANT LES VARIATIONS EN Z DES POINTS (VARIATIONS RÉELLES ET ABSOLUES).

Les variations absolues sont comprises entre 0.0083 m. et 6.951 m. L'histogramme des fréquences pour les variations en Z réelles est représenté Figure 4-16. On observe un pic des valeurs entre 0 et -0.5 m. Étant donné la précision de reconstruction initiale envisagée (0.4 m), l'imprécision des mesures GPS et leur distribution hétérogène, on peut estimer que ces résultats sont corrects. Quelques points présentent néanmoins des variations importantes (± 6 m.) et sont certainement dues à des erreurs locales de reconstruction. La Figure 4-16 présente aussi les points comparés situés sur le MNT et leur précision relative. Il est assez difficile de commenter la localisation des variations les plus grandes qui ne semblent pas être liées à des zones de topologie particulièrement complexes.

Il faut souligner le fait que cette comparaison n'est pas réellement significative de la précision de la reconstruction 3D car les données GPS sont des mesures ponctuelles réparties de manière très hétérogène sur la zone étudiée (Figure 4-15), et la précision est faible et hautement variable d'un point à un autre.

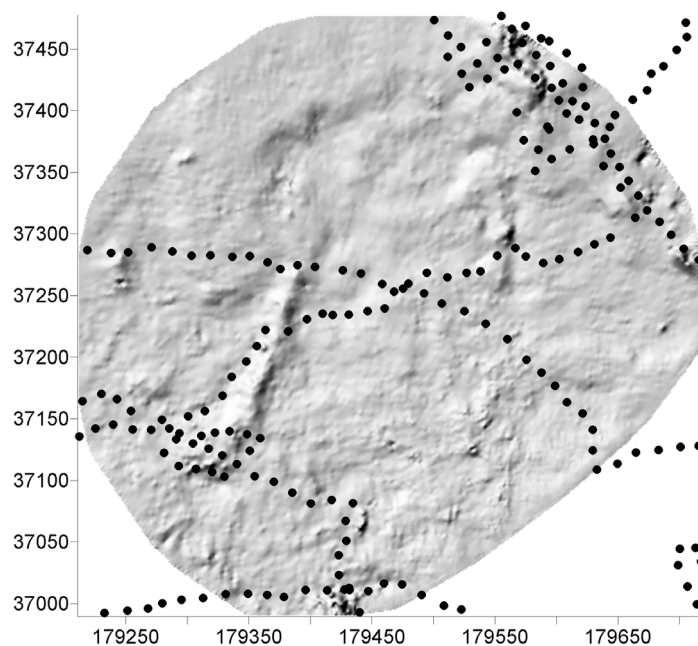


FIGURE 4-15 : MNT DU DOLOMIEU ET LOCALISATION DES POINTS GPS MESURÉS LORS DE LA CAMPAGNE PS, COMMUNS À LA ZONE D'ÉTUDE. 161 POINTS SONT LOCALISÉS SUR LA ZONE DE RECONSTRUCTION. LES DONNÉES SONT ACQUISES LE LONG DE LIGNES. LA RÉPARTITION EST DONC TRÈS HÉTÉROGÈNE.

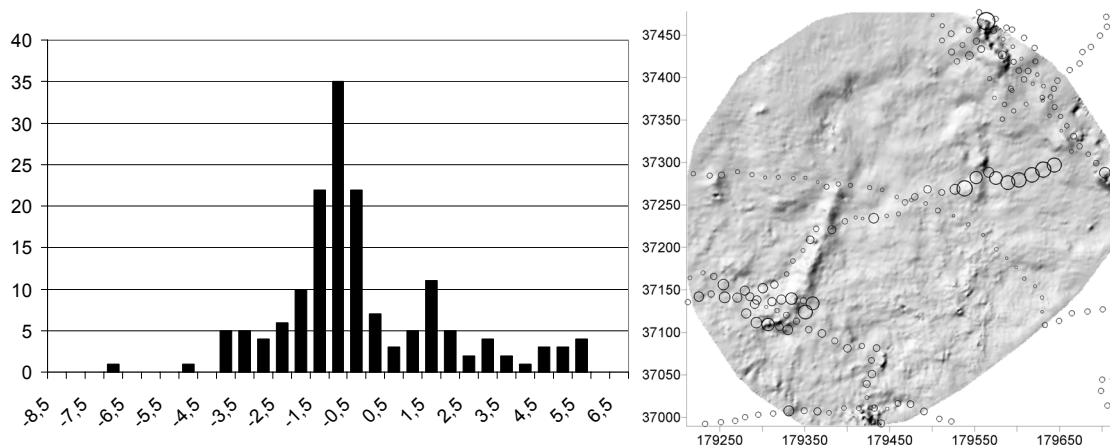


FIGURE 4-16 : A GAUCHE : HISTOGRAMME DE FRÉQUENCE DES VARIATIONS ENTRE LES POINTS GPS ET LES DONNÉES DE RECONSTRUCTION CORRESPONDANTES. A DROITE : MNT ET LOCALISATION DES POINTS COMPARÉS. LA TAILLE DES SYMBOLES VARIE EN FONCTION DE LA PRÉCISION RELATIVE DES POINTS

4.3.5 PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DE LA RECONSTRUCTION

Les problèmes rencontrés au cours des tentatives de reconstruction exposées sont d'une part relatifs à la qualité des images utilisées, d'autre part liés à certaines inadéquations du processus de reconstruction à des applications spécifiques de terrain.

- Tout d'abord, nous avons été confronté à un **problème d'occultation** partielle du cône lié à la présence de nuages et d'une partie de l'avion dans les images. Les zones du cône occultées n'ont évidemment pas pu être reconstruites (on ne reconstruit pas ce que l'on ne voit pas), mais le plus ennuyeux est que les zones occultantes dans l'image, même si elles n'affectent que partiellement le modèle 3D, perturbent de manière significative le processus de reconstruction, pouvant conduire à l'échec total de la reconstruction (incohérence totale du modèle avec la réalité). Ceci est lié au fait que ces zones occultantes se présentent dans l'image sous la forme de zones homogènes (blanches) qui ne peuvent être mises en correspondance. Si les perturbations observées sont liées à l'homogénéité des zones occultantes, et donc à un échec de la mise en correspondance, le problème reste un problème d'occultation : les zones occultées ne devraient pas être prises en considération dans la reconstruction. Idéalement, le problème pourrait être contourné en mettant en place un outil permettant de rejeter, lors de l'étape de sélection des images pour une facette donnée, les vues où la facette i se projette dans une zone occultante. Si aucune vue n'est sélectionnée pour la facette i , alors celle-ci ne devrait pas être optimisée. Cela suppose que les zones occultantes puissent être détectées automatiquement. L'homogénéité de texture présentée par ces zones peut alors être considérée comme un avantage car elle leur confère un caractère qu'il serait possible de détecter automatiquement.

- Un deuxième problème se situe au niveau des zones d'**ombre** dans les images. Ces ombres constituent des zones difficiles à mettre en correspondance car ce sont des zones peu texturées voire homogènes dans l'image. L'outil proposé précédemment pour traiter le problème d'occultation, reposant sur une détection automatique des zones homogènes pourrait également servir à traiter partiellement le problème des ombres. Partiellement car si la zone d'ombre est faiblement texturée, il nous semble important d'exploiter l'information. Pour exploiter au mieux cette information, on peut imaginer, comme certains auteurs (Fua et al., 1995), introduire un terme dans le critère d'optimisation permettant de prendre en compte les zones faiblement texturées. Cependant, les tests de reconstruction sur le Piton de la Fournaise montrent les zones d'ombres présentant une légère texture peuvent être reconstruites : c'est le cas du cratère Bory, qui a fait l'objet d'une tentative de reconstruction, présentée Figure 4-17.

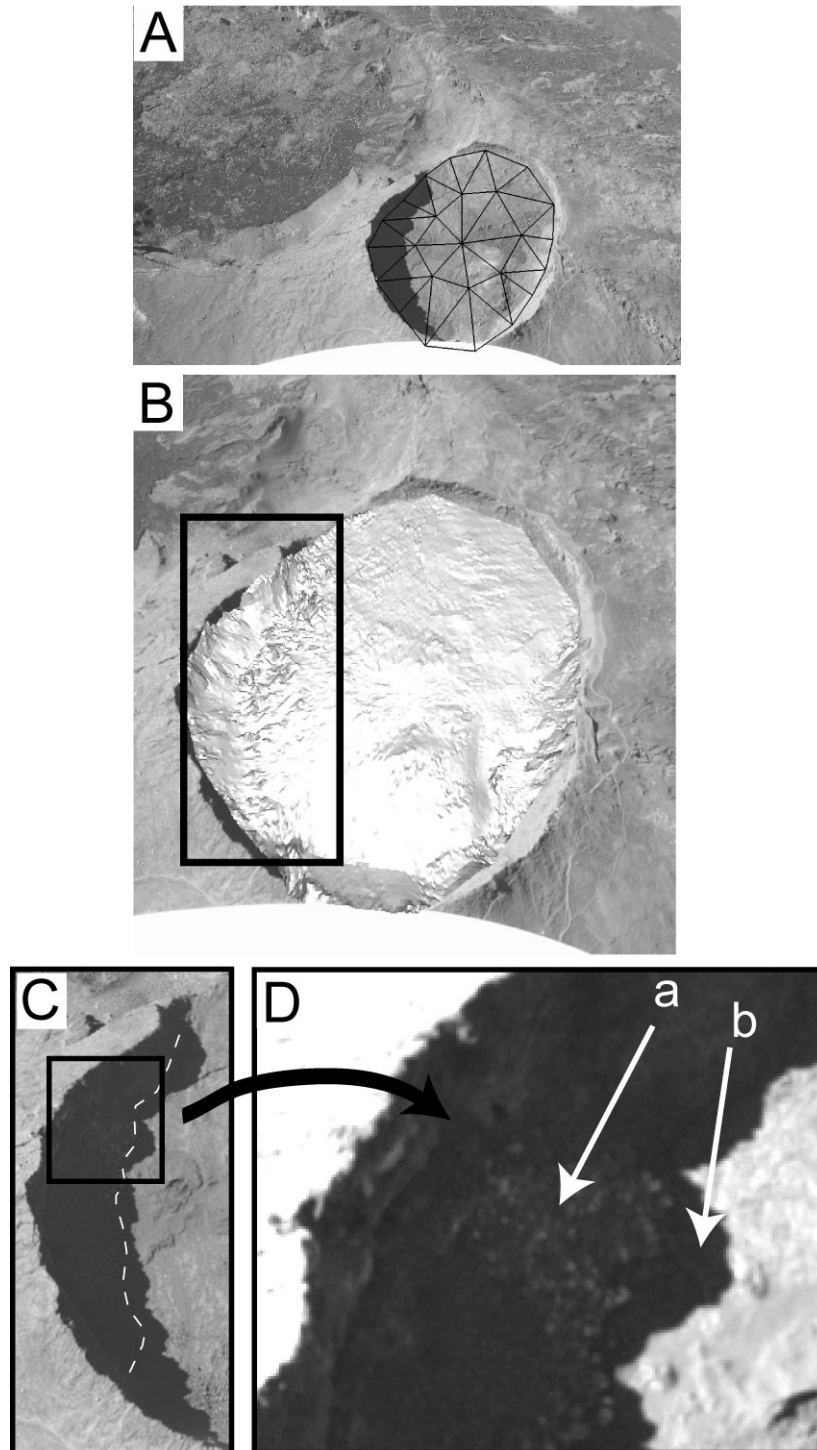


FIGURE 4-17 : RECONSTRUCTION PARTIELLE DU CRATÈRE BORY À PARTIR DES IMAGES DE LA COURONNE 1. A : LE MODÈLE INITIAL (PLAN). B : LE MODÈLE FINAL (RÉSOLUTION = 6). C : ZOOM SUR LA ZONE D'OMBRE AU NORD-EST DU CRATÈRE. LES POINTILLÉS BLANCS INDIQUENT LA LIMITE AU SEIN DE LA ZONE D'OMBRE ENTRE UNE PARTIE FAIBLEMENT TEXTURÉE ET UNE PARTIE HOMOGENÈME. LA PARTIE FAIBLEMENT TEXTURÉE À GAUCHE A PU ÊTRE RECONSTRUITE, ALORS QUE LA PARTIE DROITE A ENGENDRÉ DES PERTURBATIONS. D : DÉTAIL DE L'OMBRE. L'IMAGE A ÉTÉ RECONTRASTÉE AFIN DE METTRE EN ÉVIDENCE LES VARIATIONS DE TEXTURE. EN (A), LA PARTIE FAIBLEMENT TEXTURÉE, EN (B) LA ZONE COMPLÈTEMENT HOMOGENÈME.

- La **variation d'échelle entre le laboratoire et le terrain** a également posé un problème pour la reconstruction. En effet, elle a mis en évidence la limite de la méthode concernant la résolution possible du modèle en fin de reconstruction, qui, dans le cas du terrain, ne correspond pas à la résolution du modèle final souhaitée. Cette limite provient du fait que le système à optimiser devient rapidement très grand : une optimisation selon le critère TRG est effectuée jusqu'à une résolution 4 (plus de 1000 points et 2000 triangles), puis un autre critère, le critère « PT » est utilisé pour affiner la reconstruction (chapitre 2 section 2.3.3 « L'optimisation du modèle »). Sur le terrain, la résolution du modèle finale maximale possible, c'est-à-dire la finesse du maillage, n'est pas assez grande, notamment pour la reconstruction totale du Piton de la Fournaise. Elle ne permet pas de détecter des variations fines de la morphologie du cône (à $R=4$, la surface moyenne d'une facette est d'environ 3500 m²). Par conséquent, afin de répondre aux attentes de reconstruction initiales, il serait nécessaire de mettre en place une ou plusieurs stratégies d'allègement de la structure 3D à optimiser afin de ne pas avoir un système trop important à résoudre. Ces stratégies pourraient par exemple consister à adopter un maillage adaptatif du modèle, ou réaliser un fractionnement du modèle global en sous modèles pouvant être optimisés indépendamment les uns des autres. Ce ne sont ici que des exemples et d'autres pistes pourraient certainement être exploitées. La variation d'échelle entre le laboratoire et le terrain a également permis d'observer que des perturbations (petits pics) pouvaient apparaître lorsque la taille moyenne des facettes du modèle final était très petite (15 pixel² par exemple pour la reconstruction partielle du Dolomieu). Un filtrage inadéquat des mesures de corrélation est certainement la cause de ces petites perturbations. Des tests supplémentaires seraient nécessaires afin de confirmer l'origine de ces perturbations et d'affiner les procédures de filtrage en place dans le code.

- Le **modèle initial** utilisé a également été source de difficulté lors de la reconstruction. En effet, l'initialisation est très grossière, notamment pour le cône entier : le modèle est initialisé à partir d'une vue éloignée puis modifié manuellement pour prendre en compte quelques informations topographiques (issues du MNT au 25 m.). Sa forme est celle d'un cône tronqué et le modèle est relativement éloigné de la surface réelle, notamment la partie sommitale et le flanc Ouest du volcan (Figure 4-10). Plusieurs centaines de mètres séparent le cône réel du modèle virtuel. Le processus de reconstruction est particulièrement sensible à cet éloignement initial des deux surfaces lorsque des vues proches sont utilisées. Ainsi, la reconstruction du sommet du Piton de la Fournaise à l'aide des vues de la couronne¹ (la plus proche du sommet) est un échec total. Dans ce cas, la différence entre sommet du modèle 3D initial et le fond cratère est de 150 m pour une zone à reconstruire de 1000×1500 m. et une distance de prise de vue de moins de 1000 m, ce qui est énorme (près de 15% de la distance de prise de vue). Le choix du modèle initial est donc critique et doit être l'objet d'une attention particulière dans le processus de reconstruction. Un éloignement des conditions initiales est possible dans une certaine limite. Cette limite est relativement faible et doit être appréciée par l'utilisateur de la méthode. En effet, on s'aperçoit que la reconstruction s'est en partie accommoder de cette initialisation grossière dans le cas de la tentative de reconstruction totale du cône : le flanc Ouest du cône a été reconstruit malgré un éloignement d'environ 50 m. à la surface réelle, soit près de 2%

de la distance moyenne des images (couronne 4) au centre du modèle (Figure 4-10B et Figure 4-11). Il semble globalement qu'au delà de 5% de la distance de prise de vue, des perturbations sont envisageables.

4.4 BILAN

La méthode de reconstruction multi-vues proposée peut être envisagée comme un outil de reconstruction et de suivi de la déformation en surveillance volcanique. Le champ d'application potentiel de la méthode est large : il concerne la plupart des paysages et phénomènes volcaniques (figure 3 de l'article au paragraphe 4.2).

La transition laboratoire / terrain n'est pas immédiate. Le cas d'étude précis du Piton de la Fournaise a permis de mettre en évidence les principaux aspects de la méthode devant être modifiés afin de s'adapter à une application terrain. Ce seul cas ne peut suffire à couvrir toutes les difficultés rencontrées. Il permet néanmoins de se faire une idée plus claire des réelles possibilités d'application de la méthode sur le terrain.

Les résultats de reconstruction obtenus ne sont en effet pas complètement satisfaisants dans le sens où la reconstruction totale du cône central du Piton de la Fournaise et sa partie sommitale, initialement prévues, n'ont pu être réalisées. Les raisons à cela sont d'une part le temps insuffisant consacré aux tests de reconstruction, mais également la nécessité d'un certain nombre de modifications du code initial. Cependant, les résultats obtenus sont encourageants si l'on considère qu'aucune modification majeure n'a été apportée au code, celui-ci fonctionnant dans certaines conditions.

La méthode de reconstruction, dans son état actuel, ne répond pas exactement aux exigences de reconstruction dans le cadre d'une application terrain. Un bilan concernant les modifications à apporter afin de mieux adapter la méthode aux applications de terrain peut être établi, en partie grâce aux problèmes soulevés lors des tentatives de reconstruction du Piton de la Fournaise et exposés dans le paragraphe précédent :

- 1. Calibrage du capteur :** Le problème rencontré concerne le positionnement de la géométrie extrinsèque du dispositif d'acquisition des vues. Dans le cas du Piton de la Fournaise, la solution utilisée a consisté en l'utilisation d'amers au sol permettant le calcul des paramètres externes. Cependant leur mise en place sur le terrain est relativement longue et fastidieuse. Possible dans le cas de la mission sur le Piton de la Fournaise, cette solution, outre son aspect rudimentaire, n'est pas toujours possible si les conditions de terrain sont dangereuses. C'est par exemple le cas du volcan Santiaguito au Guatemala (paragraphe 4.2). Il est donc impératif dans l'avenir de trouver une solution plus simple permettant de positionner et d'orienter précisément le capteur dans l'espace, cela en respectant des contraintes de coût financier et de souplesse d'application. Notons qu'une mesure directe des paramètres externes est possible avec l'utilisation de plates-formes combinant GPS et centrales inertielles, associées au capteur optique (Vallet, 2002). Néanmoins ce type de plates-formes

présente actuellement un coût prohibitif pour la plupart des applications envisagées (200 000 € minimum pour la plate-forme seule). Une solution envisageable selon nous serait l'utilisation d'un GPS différentiel embarqué combinée à l'acquisition de quelques points sur le terrain (au moins trois) pour un référencement absolu de la reconstruction. Ce type de données, ainsi qu'une connaissance a priori de la zone d'étude pourrait constituer le point de départ pour le calibrage du capteur. Il est également envisageable d'optimiser par la suite à la fois les données externes de calibrage et le modèle 3D.

2. Processus de reconstruction

- **Initialisation du modèle** : l'initialisation telle qu'effectuée pour le cas du Piton de la Fournaise est possible et peut suffire, à condition de ne pas réaliser une initialisation trop éloignée de la surface réelle. Cependant, comme pour le laboratoire, il serait peut-être intéressant d'élargir les formes initiales disponibles afin d'automatiser un peu plus le processus et de gagner du temps lors de cette phase. L'intégration d'un MNT est en outre à envisager dans le cas où ceux-ci soient aisément disponibles. Il serait en effet dommage de se priver d'une information initiale aussi importante. Dans l'avenir, la totalité du globe terrestre devrait être disponible en 3D, et même si l'information reste grossière, elle peut constituer un avantage considérable pour notre application.
- Le **changement d'échelle** entre le laboratoire et le terrain soulève un problème majeur qui est la limite de résolution du modèle 3D relativement à la résolution du modèle souhaité. Ce problème a été rencontré lors de la tentative de reconstruction du cône central du Piton de la Fournaise. Il est essentiel, si l'on veut pouvoir reconstruire de manière fine la topologie d'une surface sur le terrain, de mettre en place des stratégies permettant d'alléger la structure 3D à optimiser. Le changement d'échelle de travail peut d'autre part affecter la configuration de prise de vues et poser problème quant à la gestion de celle-ci dans le code. Tout d'abord le nombre de vues utilisées lors de la reconstruction peut être plus grand et des variations d'échelle importantes entre les vues peuvent exister. C'est le cas du Piton de la Fournaise où la configuration des vues a été réalisée de manière à couvrir tout le volcan tout en gardant une résolution du pixel suffisamment grande pour la reconstruction. Un nombre de vues important ne constitue pas un problème pour la reconstruction : la durée de convergence lors de l'optimisation ne dépend pas du nombre de vues (nombre de vues fixe pour chaque facette). D'autres procédures dépendent du nombre de vues mais l'augmentation de la durée de calcul associée n'est pas significative. Par contre, même si le problème n'a pas été rencontré lors des tests de reconstruction du Piton de la Fournaise, on peut s'attendre à des problèmes de reconstruction liés à la variation d'échelle entre les images utilisées pour une même reconstruction (combinaison de vues proches et éloignées d'un même objet). En effet, l'échantillonnage actuel d'un triangle lors de l'optimisation est calculé à partir de la surface moyenne du triangle dans toutes les images où il est visible. Si la surface du triangle est très différente dans un des couples d'image servant à constituer la mesure, alors on peut prévoir que la mise en correspondance sera difficile, ce qui risque de perturber la reconstruction. Une modification du code permettant de gérer ce problème devrait être envisagée.

- La gestion des **zones occultées** dans le cas particulier de la présence de nuages et la gestion des **ombres** en tant que zones homogènes serait également souhaitable. En effet, ces deux éléments sont fréquents lors de l'acquisition d'images sur le terrain, même s'ils doivent être évités dans la mesure du possible. Dans les deux cas (nuages et ombres), il s'agit de gérer la présence de zones homogènes dans l'image. En effet, dans le cas des ombres, la mise en correspondance peut être effectuée même si la texture est faible, sachant qu'elle risque d'être moins efficace. Elle échoue par contre si la zone est dépourvue de texture. Ce cas se présente également au niveau des nuages qui peuvent être présents dans l'image sous forme de zones homogènes et perturber fortement la reconstruction. L'objectif est alors de gérer correctement ces zones afin d'obtenir des reconstructions dont certaines parties seraient non reconstruites ou d'une précision moins fiable.

- Enfin, il est nécessaire d'insister sur l'importance de la procédure de **pré-optimisation** qui doit être plus efficace dans le cadre du terrain : cette procédure permet actuellement de filtrer de manière semi-automatique les mesures qui vont être prises en compte dans l'optimisation. Une attention particulière à la procédure est essentielle car l'apparition de mesures potentiellement perturbantes pour l'optimisation est plus importante qu'en laboratoire, en raison des particularités des images observées : ombres, zones occultées, variations d'échelle, variations d'éclairage, etc.

Pour conclure, la méthode de reconstruction 3D multi-vues peut tout à fait être appliquée aux surfaces volcaniques réelles. Dans son état actuel, elle peut être utilisée sur le terrain dans certaines conditions. Cependant, des modifications sont véritablement nécessaires pour une meilleure adaptation de la méthode au contexte du terrain. Les modifications majeures à apporter concernent le calibrage du capteur (estimation des paramètres externes) et la gestion du nombre important de paramètres à optimiser lors du processus de reconstruction. La méthode semble bien adaptée aux surfaces de petite à moyenne échelle (métrique à kilométrique). L'application de la méthode à grande échelle (> 10 km²), voire à une échelle régionale n'est pas envisageable. En effet, le mode d'acquisition des vues et les limites de résolution des appareils photographiques numériques grand public (mais de bonne qualité) constituent les principaux freins pour une application à grande échelle. De plus, le code, sans modifications, n'est pas adapté à une telle échelle (optimisation de structures 3D trop importantes). La reconstruction 3D multi-vues ne rentre donc pas en concurrence avec les autres méthodes de reconstruction plus adaptées à cette échelle, notamment la stéréophotogrammétrie utilisant photos verticales de campagnes aériennes ou des images satellites. La méthode de reconstruction présentée est à concevoir comme une méthode de reconstruction locale.

Il est nécessaire d'insister sur la qualité des images utilisées, condition indispensable à la réussite de la reconstruction. Cela implique que :

- (1) la surface à reconstruire soit bien texturée, ce qui est en général le cas en contexte volcanique (paragraphe X, Cecchi et al., 2003) et ce qui a été vérifié avec la mission sur le Piton de la Fournaise,

- (2) le capteur soit de bonne qualité et adapté à l'application envisagée (résolution, choix de l'optique etc.),
- (3) l'acquisition se fasse dans de bonnes conditions afin d'éviter, dans la mesure du possible, les problèmes d'occultations et d'ombres dans les images. Le choix du moyen d'acquisition des vues est par exemple important : à moyenne échelle, l'hélicoptère semble être la solution la plus adaptée (vol stationnaire possible, maniabilité plus grande que l'avion, champ de vue plus important etc).

Dans le cadre d'une application terrain, la méthode de reconstruction multi-vues répond partiellement aux avantages attendus initialement, à savoir une gestion des surfaces de géométrie complexe grâce à l'utilisation de vues obliques, une simplicité et une flexibilité de mise en œuvre pour l'acquisition des vues, un faible coût concernant l'acquisition des données, et enfin une précision de reconstruction importante. Cette dernière doit cependant faire l'objet de tests supplémentaires pour être validée, et des efforts doivent être effectués pour acquérir une souplesse d'utilisation plus grande concernant le calibrage du capteur. Au final, on peut se demander si la méthode de reconstruction proposée doit être présentée sous la forme d'un seul et même outil pour le laboratoire et pour une application terrain. La question reste ouverte.

CONCLUSION

La méthode de reconstruction multi-vues développée dans le cadre de cette thèse permet d'appréhender de manière originale la reconstruction 3D en volcanologie, en intégrant les travaux récents de Vision par Ordinateur. Initialement envisagée comme une technique complémentaire des méthodes de reconstruction classiquement utilisées, elle offre au volcanologue une alternative intéressante dans des contextes d'application divers.

Les résultats de reconstruction 3D en laboratoire obtenus sur différents types de modèles analogiques, ont permis de valider la méthode de reconstruction en laboratoire, ce qui répond à l'objectif principal de la thèse. Ces résultats nous ont encouragé à explorer parallèlement la voie d'une application aux surfaces volcaniques naturelles, et une étude préliminaire des conditions et des possibilités de reconstruction a été effectuée. Cette étude a permis de mettre en avant le potentiel de la technique dans le cadre du terrain, et a abouti à la réalisation de tests de reconstruction sur le Piton de la Fournaise, île de la Réunion.

En laboratoire, la méthode de reconstruction multi-vues constitue un outil d'analyse et de quantification puissant de la morphologie des modèles analogiques et de ses variations. La précision de reconstruction atteinte est de l'ordre du dixième de mm pour une distance de prise de vue de 1 m. Les variations topologiques peuvent ainsi être détectées très finement par mesure sans contact, et ce dès les premiers stades de la déformation, permettant ainsi une analyse plus complète du phénomène étudié. Cette quantification précise des mouvements, dans le cadre d'expériences dimensionnées, permet également une comparaison avec les données de terrain, ce qui peut constituer un avantage considérable pour de certaines études.

Bien que les conditions de laboratoire et de terrain soient éloignées, les tentatives de reconstruction menées sur le Piton de la Fournaise ont montré que la méthode peut fonctionner, sous certaines conditions, sans modifications profondes de l'approche initiale. Ceci est extrêmement encourageant et confirme le potentiel de la méthode dans le cadre d'une application terrain. Elle doit être considérée dans ce cas comme une méthode de reconstruction locale, bien adaptée aux surfaces de petite à moyenne échelle (métrique à kilométrique). La précision de reconstruction sur le terrain n'a pu être véritablement testée, cependant les résultats obtenus montrent que la précision estimée d'après les résultats de laboratoire est proche de celle réellement obtenue.

Nous pouvons finalement résumer les principaux avantages et caractéristiques qu'offre la méthode de reconstruction développée, et qui font d'elle une approche originale en volcanologie :

(1) L'utilisation simultanée de plusieurs vues acquises autour de la surface procure une information plus riche que le traditionnel couple de vue stéréographique, se traduisant par un gain de la précision de reconstruction et une gestion plus correcte des surfaces de géométries complexes. Le mode d'acquisition des vues et leur utilisation simultanée dans le processus de reconstruction constitue une approche que l'on pourrait qualifier de plus instinctive, de plus naturelle pour appréhender un objet que l'utilisation d'un seul couple de vues verticales.

(2) Une extraction ciblée de l'information est possible grâce à l'intervention du volcanologue, impliqué de manière minimale mais indispensable dans l'acquisition des données et dans leur traitement, notamment en ce qui concerne l'initialisation d'un modèle 3D pour la surface à reconstruire. L'utilisation d'un modèle 3D initial est d'ailleurs une des originalités de la méthode, comparativement aux techniques traditionnelles. Celui-ci permet non seulement d'exploiter la connaissance a priori du volcanologue, dont il serait dommage de ne pas tenir compte, mais également d'intégrer l'information de N vues indépendantes et de s'affranchir de nombreuses difficultés liées au problème majeur de la mise en correspondance.

(4) La souplesse et la flexibilité d'utilisation constituent également l'un des avantages majeurs présentés par l'approche de reconstruction. Cela est particulièrement vrai en laboratoire, où la méthode témoigne d'une souplesse d'utilisation remarquable. Le calibrage du capteur est une étape simple, ne nécessitant que quelques minutes (acquisition et traitement des données), et pouvant s'adapter à diverses configurations. Une quinzaine de vues acquises à main levée autour du modèle permettent ensuite une reconstruction fiable et rapide. Dans son état actuel, la méthode est moins souple sur le terrain, notamment en raison de la phase de calibrage et plus particulièrement en ce qui concerne le calcul de la géométrie externe des vues, qui diffère sensiblement des configurations classiques du laboratoire.

(5) Enfin, la méthode de reconstruction développée présente l'avantage d'être financièrement concurrente des méthodes classiquement utilisées, spécialement pour ce qui est des applications de terrain.

Il serait à présent indispensable de poursuivre cette étude afin d'apporter à la méthode les modifications nécessaires à une meilleure gestion des conditions de terrain, modifications en partie dégagées lors des tentatives de reconstruction du Piton de la Fournaise. Un autre aspect extrêmement important à considérer dans l'avenir est celui du suivi de la déformation tridimensionnelle. Le calcul de champs de déplacements est en effet d'un intérêt capital, en laboratoire comme dans le cadre de la surveillance volcanologique. Le développement d'un tel outil constitue donc une suite logique de ces travaux, et, intégré au processus de reconstruction 3D, l'outil permettrait de fournir une méthode complète de reconstruction 3D et de mesure de déformation, d'autant plus attractive pour le volcanologue.

Enfin, nous soulignerons au terme de cette étude, que les travaux réalisés résultent d'une démarche de fusion d'expertise entre deux disciplines éloignées, la volcanologie et la Vision par Ordinateur. Les résultats positifs qui s'en dégagent témoignent de la richesse d'un tel métissage, et il serait intéressant dans l'avenir de continuer à tirer partie de ce type de collaboration. Des travaux tout récents en Vision par Ordinateur mettent effectivement en avant de nouvelles possibilités de transfert d'outils entre les deux disciplines (Lhuillier, 1998, Duplaquet et al., 2001).

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- Atkinson K.B., Ed. 1996. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Engineering and Science. Scotland, UK, Whittles Publishing. 371 p.
- Bachèlery P. and Mairine P. 1990. Evolution volcano-structurale du Piton de la Fournaise depuis 530000 ans. Le volcanisme de la Réunion. Monographie. Clermont-Ferrand, CRV, J.F. Lénat ed.: pp 213-242.
- Baker S., Szeliski R. and Anandan P. 1998. A layered approach to stereo reconstruction. SPIE Image Synthesis. pp 434 - 441.
- Barnard S. 1989. Stochastic stereo matching over scale. International Journal of Computer Vision 3(1): pp 17 - 32.
- Baudoin A., Boussarrie E., Damilano D., Rum G. and Caltagirone F. 2001. Pléiades: A multi Mission and Multi Cooperative Program. 52ième Congrès Astronautique International, Toulouse, France.
- Becker S. and Bove J.V. 1995. Semiautomatic 3-D model extraction from uncalibrated 2-D camera views. Visual Data Exploration and Analysis II. pp 447 - 461.
- Beyer H.A. 1992. Geometric and radiometric analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System. Zurich, Institut für Geodasie und Photogrammetrie, Nr 51, ETH.
- Borgia A. 1994. Dynamic basis of volcanic spreading. Journal of Geophysical Research 99(B9): pp 17,791 - 17,804.
- Bouquet J.Y. and Perona P. 1998. 3D photography on your desk. International Conference on Computer Vision, Bombay, India. pp 43 - 50.
- Boyer E. and Berger M.O. 1997. 3D surface reconstruction using occluding contours. International Journal of computer Vision 22(3): pp 219 - 233.
- Cecchi E., van Wyk de Vries B. and Lavest J.M. 2003. N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology. Journal of Volcanology and Geothermal Research 123: pp 181 - 201.
- Chen Q. and Medioni G. 1999. A volumetric Stereo Matching Method: Application to Image-Based Modelling. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). pp 29 - 34.
- Cipolla R. and Blake A. 1992. Surface shaper from the deformation of apparent contours. International Journal of Computer Vision 9(2): pp 83 - 112.

- Cox I., Hingorani S. and Rao S. 1996. A Maximum Likelihood Stereo Algorithm. *Computer Vision and Image Understanding* 63(3): pp 542 - 567.
- Cross G. and Zisserman A. 2000. Surface reconstruction from multiple views using apparent contours and surface texture. *Confluence of Computer Vision and Computer Graphics*, Kluwer: pp 25 - 47.
- Curless B. and Levoy M. 1996. A volumetric method for Building Complex Models from Range Images. *SIGGRAPH*. pp 303 - 312.
- Debevec P., Taylor C. and Malik J. 1996. Modelling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry and image-based approach. *SIGGRAPH*.
- Delingette H. 1997. General Object Reconstruction based on Simplex Meshes. Nice, INRIA Sophia-Antipolis: pp 64.
- DeMenthon D.F. and Davis L.S. 1995. Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code. *International Journal of Computer Vision* 15(2): pp 123 - 141.
- Donnadiou F., Kelfoun F., van Wyk de Vries B., Cecchi E. and Merle O. 2003. Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123: pp 161 - 180.
- Drap P. 1997. Photogrammétrie et modèles architecturaux. Thèse. Marseille, Université Aix-Marseille.
- Duplaquet M.L., Le Bresnais G. and Foulon G. 2001. Reconstruction 3D régularisée à partir de séquences d'images aériennes. 18ième Colloque du GRETSI, Toulouse, France.
- Dyer C. 2001. Volumetric Scene Reconstruction from Multiple Views. *Foundations of Image Understandings*: pp 469 - 489.
- Faugeras O., Ed. 1993. *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint.*, MIT Press.
- Faugeras O. 1996. *Three-Dimensional Computer Vision: A geometric Viewpoint.* Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Faugeras O. and Keriven R. 1998. Complete dense Stereovision Using Level Set Methods. *IEEE Transactions on Image Processing*. pp 336 - 344.
- Faugeras O., Laveau S., Robert L., Csurka G. and Zeller C. 1995. 3-D reconstruction of urban scenes from sequences of images: pp INRIA Tech. report 1 - 24.
- Faugeras O. and Toscani G. 1987. Camera Calibration for 3D computer vision. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Tokyo, Japan.
- Felcísimo A. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 49(4): pp 29 - 33.
- Fitzgibbon A. and Zisserman A. 1998. Automatic 3D Model Acquisition and Generation of New Images From Video Sequences. *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. pp 1261 - 1269.
- Fua P. 1997. Reconstructing Complex Surfaces from Multiple Stereo Views. *International Journal of Computer Vision* 24(1): pp 19 - 35.
- Fua P. and Leclerc Y. 1995. Object-Centered Surface Reconstruction: Combining Multi-Image Stereo and Shading. *International Journal of Computer Vision* 16: pp 35 - 36.
- Fua P. and Leclerc Y. 1998. Registration without correspondances. *Computer vision*. pp 226 - 240.

- Fua P. and Sander P. 1992. Reconstructing Surfaces from Unstructured 3D Points. European Conference on Computer Vision (ECCV).
- Garcia D. 2001. Mesures de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images, Institut National Polytechnique de Toulouse: 164 p.
- Gaspard F. 2001. Localisation et Calibration avec un Zoom. Nice, Université de Nice-Sophia Antipolis, UFR Sciences: 189 p.
- Girard M.C. and Girard C.M., Eds. 1999. Traitement des données en télédétection. Paris. 526 p.
- Gwinner K., Hauber E., Jaumann R. and Neukum G. 2000. High-resolution, digital photogrammetric mapping: A tool for earth science. EOS 81 (44): pp 513; 516; 520.
- Han M. and Kanade T. 2000. Creating 3D Models with Uncalibrated Cameras. IEEE Computer Society workshop on the Application of Computer Vision (WACV 2000).
- Hanssen R., Ed. 2001. Radar Interferometry, Data interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic publisher. 328 p.
- Harris C.G. and Pike J.M. 1987. 3D Positional Integration from Image Sequences. 3rd Alvey Vision Conference. pp 233 - 236.
- Hartley H. and Zisserman A., Eds. 2000. Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press.
- Hubbert M.K. 1937. Theory of scale models as applies to the study of geologic structures. Geol. Soc. Am. Bull.(48): pp 1459 - 1520.
- Ildefonse B., Michibayashi K. and Cecchi E. 1999. Analogue experiments on compaction and shearing of wet granular media. Application to crystallizing magmas. EUG, Strasbourg, France. pp 617.
- Journel A.G. and Huijbregts C. 1978. Mining Geostatistics, Academic Press.
- Kelfoun K. 1999. Processus de croissance et de déstabilisation des dômes de lave du Merapi (Java Centrale, Indonésie): modélisations numériques des dômes, dynamique des écoulements pyroclastiques associés et surveillance par stéréo-photogrammétrie. Clermont-Ferrand II, France, Université Blaise Pascal: 261 p.
- Kerle N. 2002. Volume estimation of the 1998 flank collapse at Casita Volcano, Nicaragua: a comparison of photogrammetric and conventional techniques. Earth Surface Processes and Landforms 27(7): pp 759 - 772.
- Kieffer G. 1990. Grands traits morphologiques de l'île de la Réunion. Le volcanisme de la Réunion. Monographie, CRV, J.F. Lénat ed.: pp 75 - 114.
- Koch R., Pollefeys M. and van Gool L. 1998. Multi Viewpoint Stereo from Uncalibrated Sequences. ECCV, Springer-Verlag, Freiburg.
- Kraus K. and Waldhäusl P., Eds. 1998. Manuel de photogrammétrie. Principes et procédés fondamentaux. Paris.
- Kutulakos K. and Seitz S. 1999. A Theory of Shape by Space Carving. International Conference on Computer Vision (ICCV). pp 307 - 314.
- Lavest J.M., Viala M. and Dhome M. 1998. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration? ECCV98, Freiburg, Germany. pp 158 - 174.

- Leclerc Y.G., Luong Q.-T. and Fua P. 2000. Measuring the self-consistency of stereo-algorithms. European Conference on Computer Vision. pp 282 - 298.
- Lhuillier M. 1998. Efficient Dense Matching for Textured Scenes Using Region Growing. British Machine Vision Conference (9th), Southampton, England. pp 700 - 709.
- Lhuillier M. and Quan L. 2002. Quasi-dense reconstruction from Image sequence. European Conference on Computer Vision ECCV, Copenhagen, Denmark. pp 125 - 139.
- Luong Q.-T. 1992. Matrice fondamentale et autocalibration en Vision par Ordinateur. Orsay, France, Université de Paris-Sud.
- Merle O. and Borgia A. 1996. Scaled experiments of volcanic spreading. Journal of Geophysical Research 101(B6): pp 13,805 - 13,817.
- Merle O. and Vendeville B. 1995. Experimental modelling of thin-skinned shortening around magmatic intrusions. Bulletin of Volcanology 57: pp 33 - 43.
- Moons T. 1998. A Guided Tour Through Multiview Relations. SMILE, Freiburg, Germany. pp 304 - 346.
- Moravec H. 1977. Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance. IJCAI77: pp 584.
- Murray J. 2002. Quiet ongoing for the Valle del bove, Mt Etna, and implications for sector collapse risk in Colima Volcano. Eighth Annual Meeting 2002, Colima, Mexico.
- Naranayan P., Rander P. and Kanade T. 1998. Constructing virtual worlds Using Dense Stereo. International Conference on Computer Vision (ICCV).
- Noronha S. and Nevatia S. 1997. Detection and description of buildings from multiple aerial images. DARPA Image Understanding Workshop, New Orleans, Louisiana, USA.
- Photogrammetry A.S.o., Ed. 1980. Manual of Photogrammetry.
- Pieraccini M., Luzi G. and Atzeni C. 2001. Terrain Mapping by Ground-Based Interferometric Radar. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 39(10).
- Poggio T., Torre V. and Koch C. 1985. Computational vision and regularization theory. Nature: pp 317.
- Pollefeys M. 2000. 3D modelling from Images. Dublin, Ireland. Katholieke Universiteit LEUVEN.
- Pollefeys M., Koch R., Vergauwen M. and Gool L.V. 1999. Hand-Held Acquisition of 3D Models With a Video Camera. 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modelling (3DIM). pp 14 - 23.
- Press W.H., Vetterling W.T., Teukolsky S.A. and Flannery B.P., Eds. 1992. Numerical Recipes in C, 2nd ed, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.
- Ramberg H. 1981. Gravity deformation and the Earth's crust. San Diego, California, Academic Press.
- Robert L. 1995. Camera Calibration without Feature Extraction. computer Vision, Graphics, and Image Processing 63: pp 314 - 325.
- Samaras D. and Metaxas D. 1998. Incorporating illumination constraints on deformable models. Computer Vision and Pattern Recognition. pp 322 - 329.
- Seitz S. and Dyer C. 1999. Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring. International Journal of computer Vision 35: pp 151 - 173.
- Sethian J.A., Ed. 1998. Level Set methods. Cambridge, Cambridge University Press.

- Shum H.Y., Han M. and Szeliski R. 1998. Interactive Construction of 3D Models from Panoramic Mosaics. *Computer Vision and Pattern Recognition*. pp 427 - 433.
- Slabaugh G., Culbertson W.B., Malzbender T. and Schafer R. 2001. A survey of methods for volumetric scene reconstruction from photographs, Center for Signal and Image Processing, Georgia Institute of Technology.
- Sullivan S. and Ponce J. 1998. Automatic Model Reconstruction, pose estimation, and object recognition from photographs using triangular splines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. pp 1091 - 1096.
- Szeliski R., Tonnesen D. and D. T. 1993. Modeling Surfaces of Arbitrary Topology with Dynamic Particles. *IEEE Conference on computer vision and Pattern Recognition*. pp 82 - 87.
- Tsai R.Y. 1989. Synopsis of recent progress on Camera Calibration for 3D Machine Vision. Khatib O., Craig, J.J., Lozano-Perez, T. editeurs: pp 147 - 159.
- Vallet J. 2002. Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des systèmes aéroportés. Ecole Polytechnique de Lausanne, Laboratoire de Photogrammétrie. Lausanne, Faculté ENAC: 170 p.
- van Bemmelen R.W., Ed. 1954. *Moutain Building*. The Hague.
- van Meerbergen G., Vergauwen M., Pollefeys M. and van Gool L. 2002. A hierarchical Symmetric Stereo Matching Algorithm using Dynamic Programming. *International Journal of computer Vision* 47(1-3): pp 275 - 285.
- van Wyk de Vries B. and Francis P.W. 1997. Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature* 387: pp 387 - 390.
- van Wyk de Vries B., Kerle N. and Petley D. 2000. A sector collapse forming at Casita volcano, Nicaragua. *Geology* 28(2): pp 167 - 170.
- van Wyk de Vries B. and Matela R. 1998. Styles of volcano-induced deformation: numerical models of substratum flexure, spreading and extrusion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: pp 1 - 18.
- van Wyk de Vries B., Wooller L.K., Cecchi E. and Murray J. 2003. Spreading volcanoes: the importance of strike-slip faults. *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice*. pp 02480.
- Villeneuve N. 2000. Apports multi-sources à une meilleure compréhension de la mise en place des coulées de lave et des risques associés au Piton de la Fournaise. Ile de la Réunion, France, Institut de Physique du Globe de Paris, Département des Observatoires. Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise.
- Wooller L.K., Murray J., Rymer H. and van Wyk de Vries B. 2003. Volcano Instability and Collapse from Basement Faulting. *EGS - AGU - EUG Joint Assembly*. pp 00304.
- Yang Y.B., Yuille A. and Lu J. 1993. Local, Global and multilevel stereo matching. *CVPR93*. pp 274 - 279.
- Zhang Z. and Faugeras O., Eds. 1992. *3D Dynamic Scene Analysis*.
- Zisserman A., Fitzgibbon A. and Cross G. 1999. VHS to VRML: 3D Graphical Models from Video Sequences. *International conference on Multimedia Systems*. pp 51 - 57.

RÉFÉRENCES PERSONNELLES

Trois articles en auteur principal ont été réalisés pour des revues scientifiques, dont un en cours de soumission. Deux des articles figurent au sein du mémoire (paragraphe 3.2 et 4.2)

Cecchi E., van Wyk de Vries B. and Lavest J.M. 2002. Videogrammetric reconstruction applied to volcanology: perspectives for a new measurement technique in volcanology. *Image Analysis and Stereology (IAS)* 21(1): pp 31 - 36.

Cecchi E., van Wyk de Vries B. and Lavest J.M. 2003. N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 123: pp 181 - 201.

Cecchi E., van Wyk de Vries B. and Lavest J.M. 2003. Flank spreading and collapse of weak-cored volcanoes. Soumis à *Bulletin of Volcanology*.