

Reconstruction et Suivi de modèles déformables en laboratoire à partir d'une analyse multi-vues

3D Reconstruction and Monitoring of deformable models in laboratory from a multi-view analysis

E. Cecchi¹ J.M. Lavest² B. van Wyk de Vries³

^{1,3} Laboratoire Magmas et Volcans – UMR 6524 du CNRS

² LASMEA – UMR 6602 du CNRS

LMV, UMR 6524 du CNRS, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
cecchi@opgc.univ-bpclermont.

Résumé

Cet article traite de reconstruction 3D appliquée à la volcanologie expérimentale. Une méthode de reconstruction multi-vues utilisant des outils de Vision par Ordinateur a été récemment développée pour des applications en volcanologie ([2]). Une synthèse des résultats de reconstruction et de suivi de modèles déformables en laboratoire obtenus selon cette méthode sont présentés ici. Ces expériences dites analogiques concernent toute la déformation des édifices volcaniques. Trois types de phénomènes géologiques faisant appel à des dispositifs expérimentaux différents sont étudiés : (1) l'étalement d'un volcan sur un substratum ductile, (2) la déformation gravitaire d'un volcan au cœur « altéré » et (3) la déformation d'un édifice volcanique en régime extensif simple. L'analyse de la déformation dans le temps est rendue possible grâce à la comparaison de reconstructions successives. Les résultats acquis permettent de valider la méthode de reconstruction à l'échelle du laboratoire où elle se révèle être, au vu des précisions de reconstruction atteintes, un outil puissant de quantification pour l'analyse de la morphologie et de la déformation des modèles étudiés.

Mots Clef

Reconstruction 3D, Multi-vues, Volcanologie Expérimentale, Déformation.

Abstract

This article deals with 3D reconstruction applied to experimental Volcanology. A multi-view reconstruction method using Computer Vision tools has been recently developed for volcanological applications ([2]). A summary of reconstruction results and deformation monitoring on laboratory experiments are presented here. These analogue experiments are all related to volcanic edifice deformation. Three types of geological phenomena corresponding to different experimental set-up are studied: (1) volcano spreading on a ductile substratum, (2) gravitational deformation of altered core

volcanoes, and (3) volcano deformation in a simple extensional context. Deformation analysis with time is possible comparing successive 3D reconstructions. Results allow validating the reconstruction method in the laboratory where it appears to be, in view of accuracy measurements obtained, a powerful tool for morphology and deformation analysis of the studied models.

Keywords

3D reconstruction, Multi-view, Experimental Volcanology, Deformation.

1 Introduction

La reconstruction 3D et les mesures de déformation de surface sont aujourd'hui des éléments incontournables en volcanologie. Les mesures indirectes sont particulièrement intéressantes et adaptées aux environnements volcaniques. Ainsi, l'analyse d'images et les techniques de photogrammétrie sont largement utilisées pour la reconstruction 3D et les études de déformation du sol.

La recherche concernant la génération de modèles numérique de terrain (MNT) est particulièrement active. Les efforts se concentrent principalement sur la précision de reconstruction, l'automatisation du processus de reconstruction, ainsi que sur une participation humaine minimale quant à la planification et l'acquisition des données, notamment quand le terrain est dangereux ou même inaccessible.

Actuellement les techniques de photogrammétrie classiquement utilisées ne répondent pas totalement aux exigences des volcanologues. Une méthode de reconstruction flexible et simple d'utilisation, applicable à différentes figures caractéristiques des contextes volcaniques serait particulièrement intéressante en surveillance volcanologique.

Des études récentes dans le domaine de la Vision par Ordinateur ont montré la possibilité d'utiliser de nouveaux outils de reconstruction en volcanologie ([7], [11], [6], [9]). Grâce à ces travaux, une méthode originale

de reconstruction 3D multi-vues a été développée spécialement pour des applications volcanologiques. Cette méthode, décrite dans [2] et [3], a été développée et testée en laboratoire sur des expériences analogiques représentant des volcans à petite échelle construits à l'aide de matériaux analogues. Les modèles utilisés pour la reconstruction correspondaient à des cônes statiques de sable et de plâtre, mélange cohésif, d'une dizaine de cm de hauteur. L'utilisation de la méthode en laboratoire constitue un outil à part entière en volcanologie. L'acquisition de modèles 3D précis permet en effet l'analyse morphologique et structurale fine des expériences, complétant alors les observations visuelles, ainsi que la quantification de la déformation lorsqu'il s'agit de modèles dynamiques. En outre, les mesures de précision de reconstruction effectuées en laboratoire et quelques analyses préliminaires des conditions de terrain ([3]) ont montré que la méthode présente des perspectives intéressantes concernant son application à des surfaces volcaniques réelles.

Cet article a pour objectif de présenter une synthèse des résultats de reconstruction obtenus en laboratoire sur différents types de modèles analogiques, validant ainsi la technique développée et précisant son champ d'application dans le domaine de l'expérimentation en volcanologie. Ces expériences concernent la déformation des édifices volcaniques et mettent ainsi en jeu des modèles dynamiques, dont l'analyse de la déformation dans le temps est rendue possible grâce à des reconstructions successives. La précision de mesure obtenue grâce à l'utilisation d'outils de Vision par Ordinateur ouvre de nouvelles perspectives en volcanologie expérimentale. Un bref rappel de la méthode est tout d'abord nécessaire.

2 Méthode de reconstruction 3D

La méthode de reconstruction repose sur deux étapes principales.

La première consiste à étalonner le capteur et à calculer de manière précise l'attitude spatiale du capteur autour de l'objet à reconstruire. Une méthode de calibrage multi-images basée sur une approche photogramétrique et prenant en compte la distorsion optique du système est utilisée ([8]). La connaissance approximative d'une mire 2D permet d'accéder, via des approches analytiques ([4], [5]) à une solution initiale compatible avec le domaine de convergence de l'ajustement de faisceaux (Bundle Adjustment) réalisé. Celui-ci est basé sur un critère décrivant l'erreur de projection des points de la mire dans les images. Trois types de paramètres seront optimisés :

- 9 paramètres intrinsèques décrivant le capteur : focale ($f_x = f/dx$ et $f_y = f/dy$ avec dx et dy les facteurs d'échelle de la forme du pixel élémentaire), point principal dans l'image (u_0 et v_0) et 5 coefficients de polynômes modélisant la distorsion radiale et tangentielle.

- $3 \cdot n$ paramètres correspondant aux coordonnées des points 3D de la mire (X, Y, Z), n étant le nombre de points sur la mire,
- $6 \cdot m$ paramètres correspondant à la position (X, Y, Z) et l'orientation (3 angles d'Euler) du capteur pour chaque vue, m le nombre d'images utilisées.

En pratique, deux séries de vues sont acquises : une première est capturée de manière convergente autour de la mire 2D, une deuxième autour de l'objet à reconstruire.

A ce stade deux configurations sont possibles : si le dispositif expérimental le permet, le model analogique est construit sur la mire de manière à laisser quelques points 3D (pastilles photoréfléchissantes circulaires) qui vont permettre de calculer la géométrie extrinsèque du dispositif. Il est alors possible de combiner les deux séries de vues dans le processus de calibrage pour calculer simultanément tous les paramètres décrits précédemment.

Dans le cas où le modèle analogique ne repose pas sur la mire d'étalonnage, comme c'est le cas dans certaines expériences présentées dans le présent article, les deux séries de vues sont traitées séparément : Seuls les paramètres intrinsèques sont intéressants à l'issue du calibrage de 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, connaissant les paramètres intrinsèques, de calculer les paramètres externes (ainsi que la position exacte des pastilles).

La deuxième étape concerne le processus de reconstruction de la scène. On fait l'hypothèse que l'on connaît approximativement la scène à reconstruire, ce qui constitue en volcanologie une hypothèse simple et réaliste. La reconstruction repose sur la déformation itérative d'un modèle 3D initial, avec un raffinement du maillage à chaque itération, de manière à satisfaire un critère basée sur une cohérence de texture multi-images. Étant donné que la méthode a été développée à partir de modèles analogiques représentant des cônes de sable et de plâtre, le modèle initial est originellement un cône parfait composé de N facettes triangulaires de même taille et de P points 3D. 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. Chaque facette du modèle est en effet visible dans un certain nombre d'images, et la géométrie du modèle est calculée afin de minimiser, au sens des moindres carrés, l'erreur de projection (corrélation centrée normée) de toutes les facettes dans les images où elles sont visibles.

3 Données expérimentales

Trois principaux phénomènes volcanologiques sont étudiés dans les expériences présentées dans cet article. Il s'agit de :

1. L'étalement d'un volcan. Ce phénomène d'étalement d'un volcan sous son propre poids est fréquent sur les volcans et peut être provoqué dans la nature par différents facteurs, comme la présence d'un substratum ductile. La déformation qu'il engendre au niveau de l'édifice et de son substratum a été reconnue à différents endroits ([1], [12], [14]) et peut dans certains cas conduire à un risque majeur d'effondrement de flanc.
2. La déformation gravitaire des volcans au « cœur » altéré. Ce type de déformation a été soupçonné récemment ([13]) et est lié à la présence d'un corps de moindre résistance au sein d'un volcan, créé par l'activité d'un système hydrothermal. Les modèles analogiques présentés ici brièvement constituent une approche permettant la caractérisation des structures de déformation liée à ce type de phénomène.
3. La déformation d'un édifice en régime extensif simple. Ce type de déformation se produit lorsque l'édifice volcanique se retrouve en régime extensif, c'est-à-dire qu'il se situe par exemple à l'aplomb ou proche d'une faille normale et/ou décrochante, entraînant une déformation dans l'édifice et son substratum ([16]).

3.1 Dispositifs expérimentaux

Les matériaux analogues utilisés dans ces expériences sont le sable, ou un mélange de sable et de plâtre présentant une cohésion intéressante, pour représenter les roches au comportement dit fragile de l'édifice volcanique, et le silicone, permettant de représenter un corps au comportement ductile, comme les roches des roches sédimentaires ([10], [13]).

Le dispositif expérimental est très simple dans chaque cas. Le modèle analogique est construit sur un support horizontal, sur lequel des pastilles permettant le calibrage du capteur sont positionnées. Six à huit pastilles visibles dans chaque image sont en général nécessaires. Le mélange sable / plâtre constitue naturellement une texture suffisante pour effectuer une corrélation dans les images. Cette texture est cependant renforcée par un saupoudrage de plâtre et de particules sombres (carbure de silicium) afin de garantir une micro et une macro texture dans les images permettant et facilitant le processus de corrélation. La figure 1 correspond au schéma d'un modèle de type étalement d'un volcan, que l'on désignera comme type 1. Les types 2 et 3 correspondront dans le texte qui suit aux expériences de déformation gravitaire et de déformation en régime extensif respectivement. Les expériences de type 1 et 3 font références aux travaux de [15] et [16].

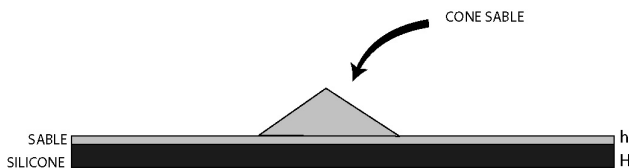


FIG. 1 – Schéma d'un modèle analogique d'étalement gravitaire (type 1)

La figure 2 schématise les expériences de type 2. Deux types de modèles sont réalisés pour l'étude de ce phénomène : un premier où l'inclusion de silicone est centrée par rapport au centre du cône, un deuxième où l'inclusion est excentrée. Plusieurs séries d'expériences sont en réalité effectuée pour l'étude du phénomène, où divers paramètres géométriques sont testés. Dans les cas présentés, l'inclusion est un cylindre et la pente du cône est de près de 40°.

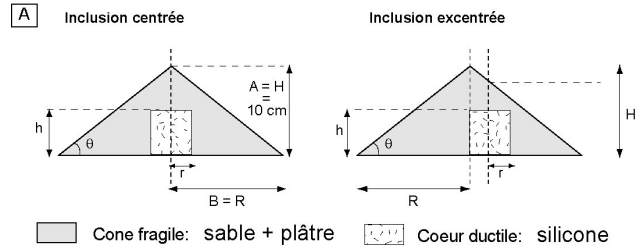


FIG. 2 – Schéma d'un modèle analogique de déformation gravitaire d'un volcan au cœur altéré (type 2). A gauche un modèle avec inclusion de silicone centrée, à droite, avec inclusion excentrée. H = hauteur du cône. R = rayon du cône. h = hauteur de l'inclusion. r = rayon de l'inclusion. θ est la pente du cône.

Le dispositif expérimental du type 3 est légèrement différent (Figure 3) : le modèle est placé sur un support horizontal dont une partie est mobile. Le mouvement du plateau est possible selon X, Y et Z. Dans le cas présenté, ce mouvement est simplement selon Z (simulation d'une faille normale).

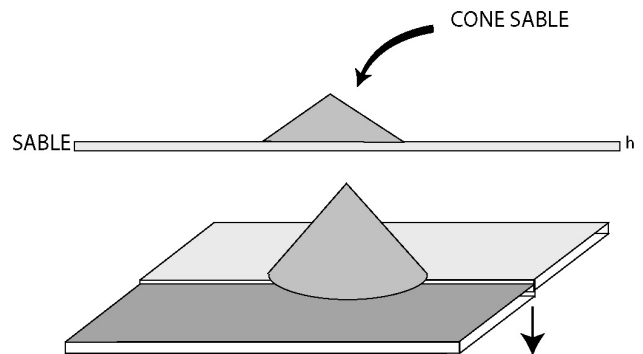


FIG. 3 – Schéma d'un modèle analogique d'étalement gravitaire (type 3)

3.2 Acquisition des vues

Pour chaque type d'expériences, plusieurs séries de vues sont acquises dans le temps.

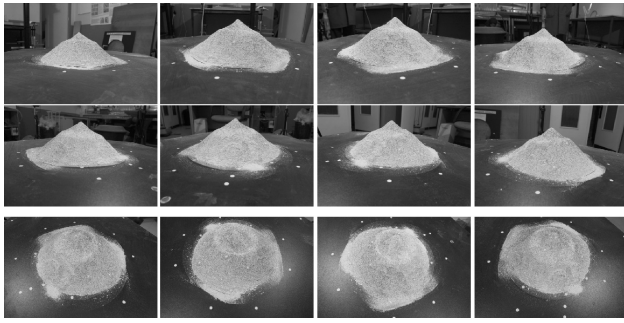


FIG. 4 – Exemple d'acquisition autour d'un modèle analogique (type 2, inclusion centrée). Au total 12 images sont prises.

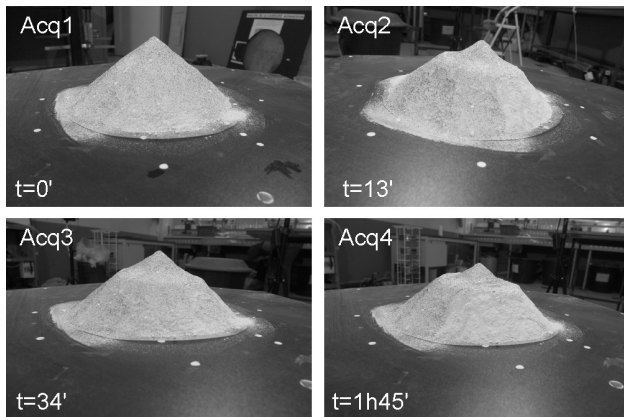


FIG. 5 – Exemple d'acquisition lors d'une expérience (type 2, inclusion centrée). 4 séries de photos, de 12 vues chacune sont réalisées. Ici seule une vue parmi les 12 pour chaque série est représentée.

Chaque série est composée de 10 à 15 vues, en général 12, dont 8 sont prises à intervalles à peu près régulières selon une couronne à mi-hauteur autour du modèle, et dont 4 sont prises de manière plus plongeante. La couronne à mi-hauteur permet l'obtention d'images fournissant une information en z de qualité, qui nous permettra également d'apprécier visuellement la qualité de reconstruction du modèle par projection de celui-ci dans les images et vérification de la correspondance des profils. La deuxième couronne plus haute permet d'être garanti de la couverture complète de la surface à reconstruire.

4 Résultats de reconstruction

Les résultats de reconstruction obtenus pour chaque type d'expériences sont présentés dans ce paragraphe. Les modèles 3D apparaissent comme des surfaces ombrées.

4.1 Type 1

Une expérience de type 1 est réalisée et 5 reconstructions successives sont effectuées à partir de 5 séries de vues (Figure 6). A titre d'échelle, la hauteur totale du modèle

en début d'expérience est d'environ 6 cm. D'un point de vue géologique, on observe un étalement progressif du cône, avec l'apparition de structures singulières : des failles normales découpent le cône et forment des grabens en forme de « feuilles ». Des ridules apparaissent également sur le substratum, à quelques centimètres du cône, et correspondent à des chevauchements. Chaque reconstruction possède un peu plus de 30 000 facettes.

4.2 Type 2

Deux expériences sont réalisées, la première correspond à un modèle avec une inclusion de silicone centrée (Figure 7), la deuxième à un modèle avec une inclusion excentrée (Figure 8). Chaque expérience produit un type de déformation avec des structures similaires, mais symétriques dans un cas et asymétriques dans l'autre. Cette différence de géométrie initiale dans les modèles est importante car la notion de stabilité de pente et par conséquent de risque d'effondrement y est étroitement liée. Dans les deux expériences, un affaissement de la partie sommitale du cône et un bombement de sa partie médiane sont très rapidement visibles. Les flancs affectés par la déformation adaptent un profil particulier concave-convexe-concave. Dans le cas symétrique (Figure 7), le sommet du cône s'affaisant est délimité par une série de failles normales circulaires, et la partie médiane se caractérise par des zones de glissement et d'effondrement. Une légère asymétrie est visible et est liée à la construction initiale du cône. Dans l'expérience à inclusion excentrée, un axe de déformation préférentiel se développe. Un étalement du cône s'effectue selon cet axe, avec d'abord l'apparition d'une faille normale à l'arrière lui faisant face, créant alors des grabens sommitaux. La partie médiane est également marquée par des épisodes de glissement et d'effondrement. Outre les différences nettes entre ces expériences et celle du type 1 concernant les structures de déformations, une autre caractéristique apparaît immédiatement : une surface beaucoup moins lisse est visible dans ces expériences. Cette différence s'explique dans la manière dont ont été construits les modèles. Dans les deux cas, les cônes sont réalisés à l'aide d'un entonnoir, mais un saupoudrage final a été effectué pour le type 1, alors que pour les expériences du type 2, l'écoulement granulaire reste apparent et est fidèlement reconstruit.

4.3 Type 3

Dans l'expérience réalisée, le déplacement de la partie support mobile s'effectue selon Z seulement et est localisé sous le cône, à proximité de sa base. Cinq reconstructions successives sont réalisées (Figure 9). Le déplacement de la plaque mobile engendre la formation sur le cône d'une faille normale en forme de V et passant par le sommet, se prolongeant dans le substratum. La zone délimitée par cette faille présente également des zones de glissement et d'effondrement visibles à partir du MNT n°3, avec l'apparition de structures de chevauchements.

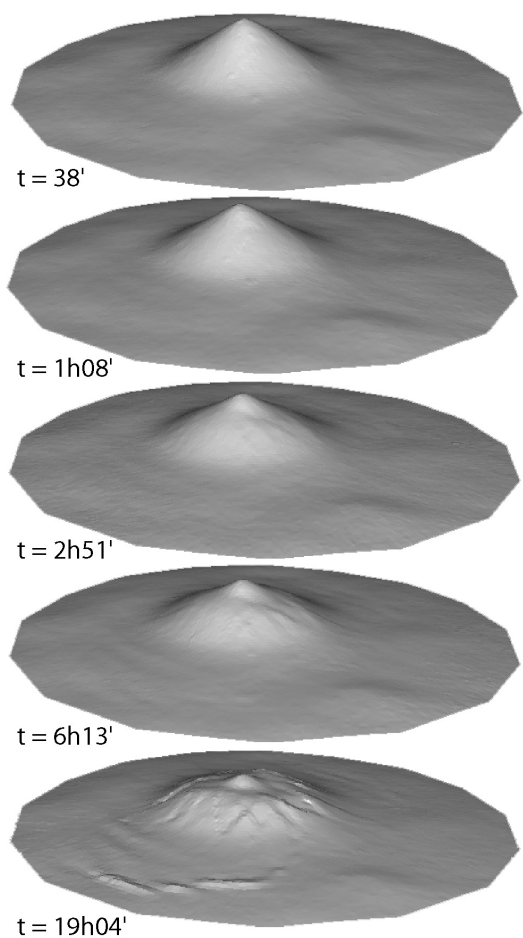


FIG. 6 – Les 5 reconstructions d'un modèle de type 1.

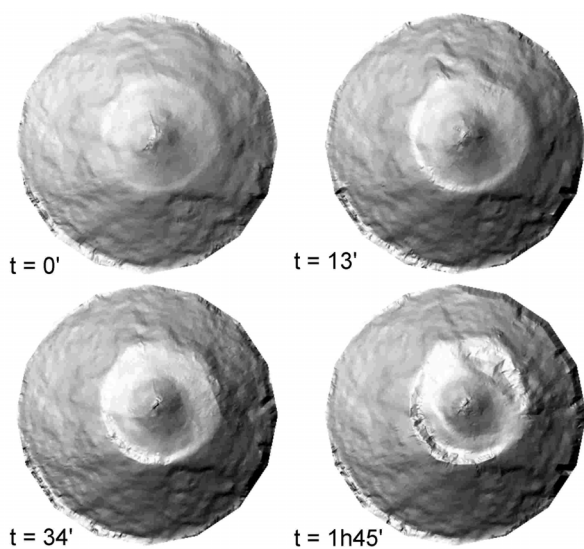


FIG. 7 – Les 4 reconstructions successives d'un modèle de type 2 avec inclusion centrée.

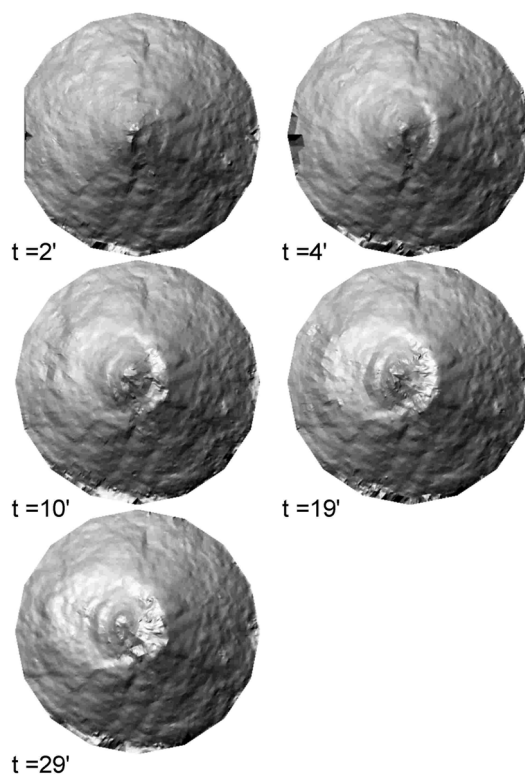


FIG. 8 – Les 5 reconstructions successives d'un modèle de type 2 avec inclusion excentrée.

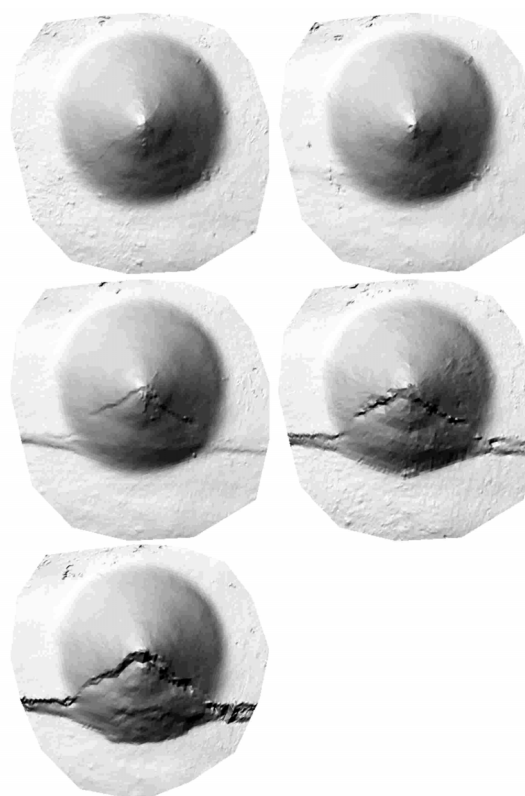


FIG. 9 – Les 5 reconstructions successives d'un modèle de type 3.

5 Bilan des reconstructions

Les reconstructions des différentes expériences sont visuellement satisfaisantes et correspondent à l'analyse qualitative effectuée en temps réel et à partir ces images.

Une première remarque peut être faite quant à la résolution des modèles présentés. Les modèles reconstruits sont tous composés d'un peu plus de 30000 facettes, correspondant à six subdivisions successives du modèle. Cette résolution est la résolution maximale pour deux raisons. La première est que la taille des grains composant le modèle analogique ne permet pas d'aller plus loin dans la reconstruction étant données la résolution du capteur et la distance de prise de vue. La deuxième raison est que le système à résoudre lors de l'optimisation non linéaire (procédure de Levenberg-Marquardt) devient trop grande, et ce dès la résolution précédente comportant environ 8000 facettes (subdivision régulière d'une facette en 4). En fait, l'obtention de modèles à 30000 facettes se fait en utilisant dans le code deux critères d'optimisation : le premier est celui détaillé dans [2], basé sur une cohérence de texture des facettes projetées dans les images où elles sont visibles. Le deuxième est également basé sur une cohérence de texture, mais cette fois on considère non plus l'échantillonnage de l'ensemble des facettes projetées dans les images, mais un échantillonnage autour des points 3D (fenêtres de taille variable) du modèle projetés dans les images où ils sont visibles (Figure 10). Chaque point est alors optimisé de manière indépendante, avec le vecteur de paramètres inconnus suivant :

$$\Phi = (\alpha, \beta, z) \quad (1)$$

$3\vec{n}(n_x, n_y, n_z)$ 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.

Ce deuxième critère peut s'écrire comme suit :

$$C(\Phi) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (V_i - V_j)^2 \quad (2)$$

avec :

- N le nombre d'images où le point P est visible, avec $N \leq N_{\max} = 5$.
- V_i et V_j les vecteurs de luminance centrés et normés correspondant à l'échantillonnage d'une fenêtre de taille x dans les images i et j . L'échantillonnage est réalisé de manière à correspondre à 1 pixel dans l'image.

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 premier critère où, à une résolution 5 par exemple, la

matrice Jacobienne (procédure de Levenberg-Marquardt) à optimiser est au moins de taille 8000x4200.

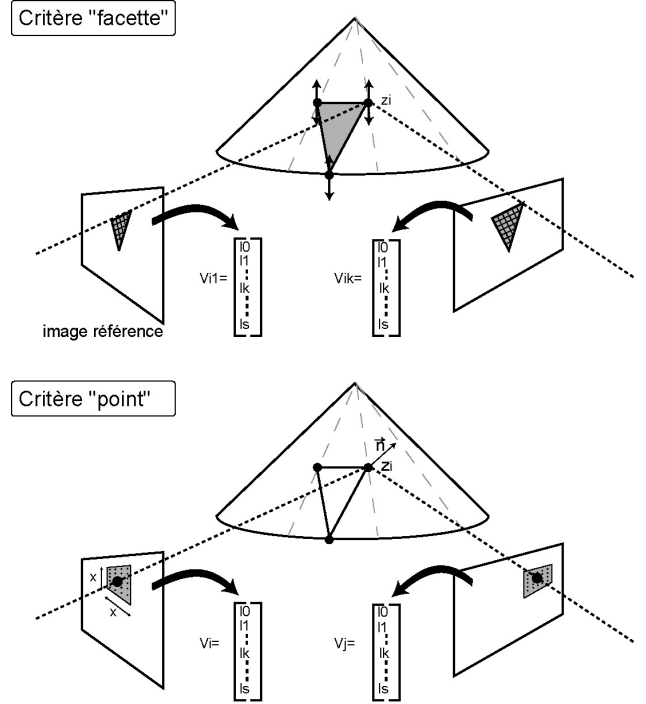


FIG. 10 – Schématisation des deux critères utilisés. $l_0, l_1, \dots, l_s$ sont les luminances des points d'échantillonnages des facettes ou des fenêtres.

Le deuxième point que l'on peut soulever concerne la reconstruction des figures complexes telles les fractures. En effet, on observe qu'en présence de fractures importantes, comme c'est le cas en fin de déformation pour les expériences de type 2 et 3, des perturbations apparaissent dans la reconstruction. La reconstruction des ruptures de pente que constituent ces fractures est délicate dans notre processus car une facette peut se trouver « à cheval » sur cette rupture et provoquer une instabilité. Cependant, étant donnée que chaque facette est contrainte par ces voisines, la reconstruction gère à priori ce cas de figure. Le phénomène de perturbation observé semble s'expliquer par le fait que l'information alors disponible pour reconstruire de manière précise ces zones particulières est insuffisante (nombre et disposition des vues).

De petite perturbation se rencontrent également en limite des modèles et correspondant au passage à des zones non texturées (support du modèle). La texture est en effet une des hypothèses initiales fortes qui doit être respectée avant d'entamer le processus de reconstruction.

6 Suivi de la déformation

Pour chaque expérience, les reconstructions sont réalisées dans le même référentiel. Il est donc possible de comparer les reconstructions successives en effectuant une différence selon Z de tous les points reconstruits, permettant ainsi de localiser et de suivre les variations en Z lors de la déformation. Malgré que les reconstructions successives aient en commun leur modèle initial, la grille finale des points en XY est différente car le sommet du modèle 3D est le seul point pouvant bouger dans les trois directions lors de l'optimisation. Cela entraîne une légère différence de position des points en XY qui est répercutée lors des subdivisions successives du maillage. On recalcule alors, pour comparer les modèles, une grille XY régulière de points à partir des résultats de reconstructions. Cette étape est réalisée en utilisant le logiciel SURFER (Surface Mapping System, Golden Software Inc.) qui permet de calculer une grille par interpolation linéaire des 3 points les plus proche de chaque nœud de la nouvelle grille.

La figure 11 présente les 4 cartes de déformation en Z correspondant aux différences entre MNT successifs pour l'expérience de type 1 (Figure 6). On observe qu'une déformation est détectable en début d'expérience. Cette déformation consiste en un étalement du cône révélé sur la carte acq1-acq2 par une zone de dépression centrale circulaire et une couronne externe à $\Delta z > 0$, séparées par une zone de transition sans mouvement apparent. Le schéma figure 12 illustre ce qui se produit. Des variations de 0.2 mm sont détectées, ce qui est impossible à l'œil nu. L'étalement se poursuit, plus lentement après quelques heures (voir l'amplitude du mouvement total par rapport au temps avec la figure 6), et des zones de faibles variations en Z apparaissent de manière radiale sur le cône et correspondent à la formation de failles normales. Les chevauchements du substratum apparaissent tardivement.

Les figures 13, 14 et 15 présentent les différentes cartes de déformation en Z obtenues lors des autres expériences (respectivement les expériences schématisées Fig.2 et Fig.3 dont les reconstructions sont présentées Fig.7, 8, 9) et montrent que la déformation détectée dans chaque cas est ≤ 1 mm. Les erreurs de reconstruction en limite des modèles ou au niveau des fractures apparaissent clairement sur les cartes de déformation figures 13, 14 et 15. Des précautions (analyse parallèle des MNT par exemple) doivent être prises quant à l'interprétation des variations en Z au niveau des fractures car il faut alors distinguer les erreurs de reconstruction de la déformation réelle.

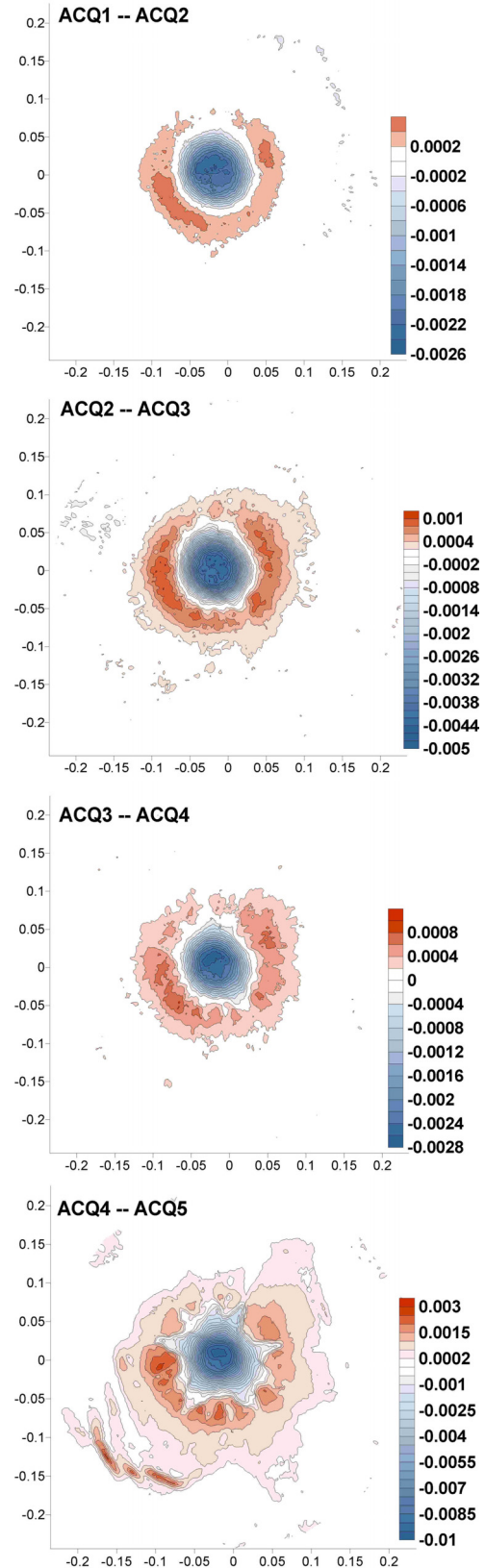


FIG. 11 – Cartes de déformation en Z pour l'expérience de type 1 (correspondant aux MNT de la figure 6). Chaque niveau correspond à une variation en z de 0.2 mm, le rouge représentant une déformation positif, le bleu un Z négatif.

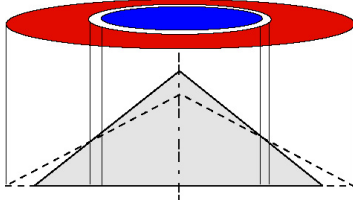


FIG. 12 – Étalement d'un cône et déformation en Z produite. Cône initial en gris et final en pointillé.

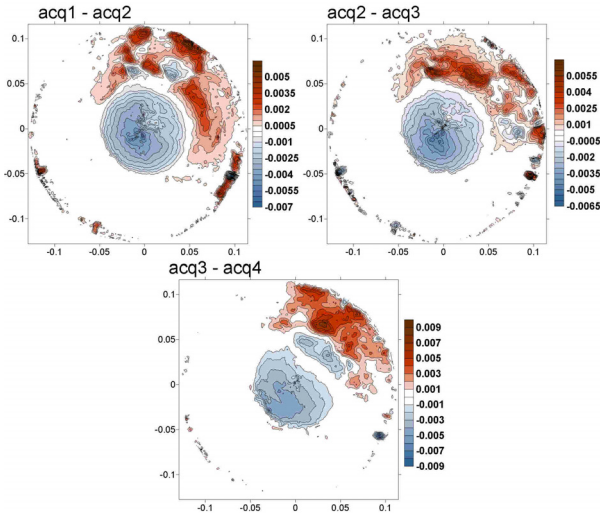


FIG. 13 – Cartes de déformation en Z pour l'expérience de type 2, avec inclusion centrée (correspond aux MNT de la figure 7). Chaque niveau correspond à une variation en z de 0.5 mm pour les deux premières cartes, et à 1 mm pour la dernière.

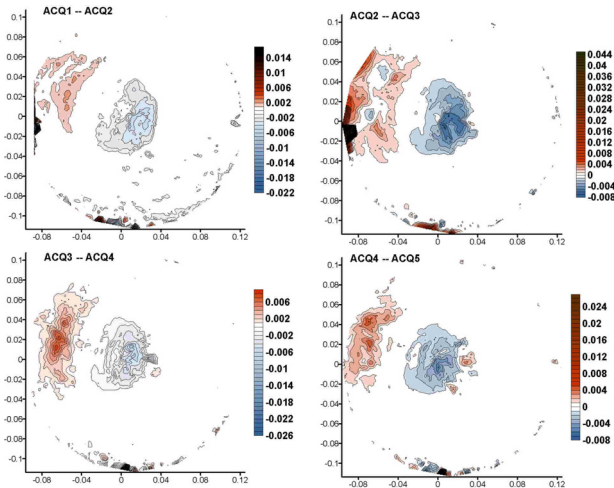


FIG. 14 – Cartes de déformation en Z pour l'expérience de type 2, avec inclusion excentrée (correspond aux MNT de la figure 8). Chaque niveau correspond à une variation en z de 1 mm

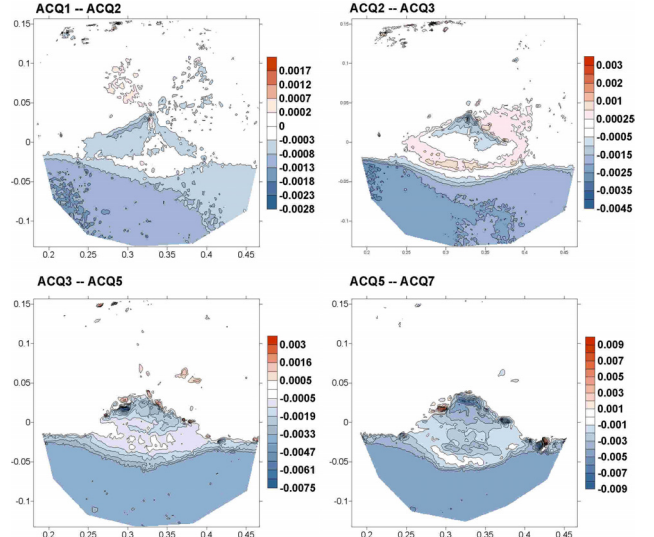


FIG. 15 – Cartes de déformation en Z pour l'expérience de type 3 (correspond aux MNT de la figure 9). Chaque niveau correspond à une variation en z de 0.5 mm pour les deux premières cartes, à 0.7 et 1 mm pour les deux dernières.

7 Mesures de précision

La précision de reconstruction a été évaluée dans [2] en utilisant un cône en PVC texturé de dimensions connues. L'écart-type de la distance des points 3D reconstruits au cône parfait passant au mieux par tous ces points était de 3.10^{-4} m. pour une distance caméra-objet de 0,5 m. (soit une reconstruction à 0,6 mm pour une distance de 1m.). La forte dépendance de ce résultat à la texture présentée par le cône avait été soulignée. L'expérience a été réitérée en utilisant cette fois un cône en aluminium présentant une texture plus fine (Figure 16). 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 (reconstruction à 0,09 mm pour une distance de 1m.). Cette précision correspond à 1/11111 du champ, ce qui conduit à des corrélations subpixelaires 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 du cône usiné et du cône reconstruit peuvent aussi être comparés. Dans le cas du cône en PVC, l'angle sommital est retrouvé à quelques dixièmes de degrés près (entre 0,2 et 0,38° près), ce qui correspond à la précision d'usinage angulaire du cône de 0,33°. Concernant le cône en aluminium présentant une texture plus fine, l'angle sommital est retrouvé 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 ici d'1 minute (1/60°).

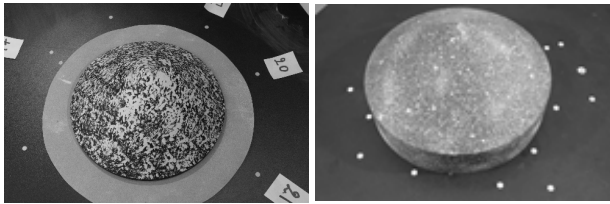


FIG. 16 – Photo du cône en PVC et du cône en aluminium de texture plus fine servant aux mesures de précision.

Une idée de la précision de reconstruction est également donnée par les cartes de déformation en Z présentées au paragraphe précédent. En effet, la plus petite variation de mouvement détectée et non bruitée indique en quelque sorte la limite de précision de reconstruction, qui dépend bien-sûr de chaque type de donnée.

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

8 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 méthode de reconstruction 3D proposée et spécifique à ce type d'application est validée par les résultats de reconstruction présentés où divers protocoles expérimentaux sont testés. Si un certain nombre de conditions expérimentales sont respectées, la reconstruction 3D complète est possible jusqu'à une précision inférieure au dixième de mm. pour une distance de prise de vue de 1 m. Ces conditions particulières sont un éclairage adapté, un modèle d'étude texturé, une optique de bonne qualité, et une couverture complète du modèle par les différentes vues. 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 inframillimétrique 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. Le transfert de la méthode à des surfaces réelles est également envisageable et constituerait dans l'avenir un outil prometteur en surveillance volcanologique. Il nécessite cependant un grand nombre de modifications du code original, notamment en ce qui concerne le positionnement de la géométrie extrinsèque du dispositif d'acquisition d'images sur le terrain et le changement d'échelle réalisé.

Bibliographie

[1] A. Borgia, Dynamic basis of volcanic spreading, *Journal of Geophysical Research*, 99 (B9), pp. 17,791 - 17,804, 1994.

[2] E. Cecchi, J. M. Lavest and B. van Wyk de Vries, *Reconstruction multi-images appliquée à la Volcanologie*, in *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA)*, Angers, pp. 463 - 470, 2002.

[3] E. Cecchi, B. van Wyk de Vries and J. M. Lavest, N-view reconstruction: a new method for morphological modelling and deformation measurement in volcanology, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, pp. 181 - 201, 2003.

[4] D. F. DeMenthon and L. S. Davis, Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code, *International Journal of Computer Vision*, 15(2), pp. 123 - 141, 1995.

[5] O. Faugeras and G. Toscani, *Camera Calibration for 3D computer vision*, in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Tokyo, Japan 1987.

[6] P. Fua and Y. Leclerc, Object-Centered Surface Reconstruction: Combining Multi-Image Stereo and Shading, *International Journal of Computer Vision*, 16, pp. 35 - 36, 1995.

[7] K. Kutulakos and S. Seitz, *A Theory of Shape by Space Carving*, in *International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 307 - 314, 1999.

[8] J. M. Lavest, M. Viala and M. Dhome, *Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera calibration?*, in *ECCV98*, Freiburg, Germany, pp. 158 - 174, 1998.

[9] M. Lhuillier, *Efficient Dense Matching for Textured Scenes Using Region Growing*, in *British Machine Vision Conference (9th)*, Southampton, England, pp. 700 - 709, 1998.

[10] O. Merle and A. Borgia, Scaled experiments of volcanic spreading, *Journal of Geophysical Research*, 101 (B6), pp. 13,805 - 13,817, 1996.

[11] P. Naranayan, P. Rander and T. Kanade, *Constructing virtual worlds Using Dense Stereo*, in *International Conference on Computer Vision (ICCV)1998*.

[12] B. van Wyk de Vries and P. W. Francis, Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading, *Nature*, 387, pp. 387 - 390, 1997.

[13] B. van Wyk de Vries, N. Kerle and D. Petley, A sector collapse forming at Casita volcano, Nicaragua, *Geology*, 28 (2), pp. 167 - 170, 2000.

[14] B. van Wyk de Vries and R. Matela, Styles of volcano-induced deformation: numerical models of subtratum flexure, spreading and extrusion, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81, pp. 1 - 18, 1998.

[15] B. van Wyk de Vries, L. K. Wooller, E. Cecchi and J. Murray, *Spreading volcanoes: the importance of strike-slip faults*, in *EGS - AGU - EUG Joint Assembly*, Nice, pp. 02480, 2003.

[16] L. K. Wooller, J. Murray, H. Rymer and B. van Wyk de Vries, *Volcano Instability and Collapse from Basement Faulting*, in *EGS - AGU - EUG Joint Assembly*, pp. 00304, 2003.