

# Mise en œuvre d'une méthode de mesure de déformations terrain avec des images très haute résolution spatiale

Thirard Louise, INSA Strasbourg

Février 2012 – Août 2012

CEA, Centre de Bruyères-le-Châtel, Laboratoire de Télédétection et Surveillance de l'Environnement (LTSE)

Directeur de stage : R.Binet





## **Remerciements**

Je remercie tout d'abord P.Carrie, directeur du laboratoire TSE, pour m'avoir accueilli comme stagiaire au sein du laboratoire LDG du CEA.

Je tiens tout particulièrement à remercier R.Binet, mon directeur de stage, pour les conseils et la confiance qu'il m'a accordés et pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de mon stage, malgré un emploi du temps chargé.

Je tiens également à remercier D.Nobileau, C.Danylo et G.Quin, pour l'attention et l'aide qu'ils m'ont apportées pendant le stage.

Enfin, je tiens à remercier les équipes des laboratoires TSE et RSG du CEA pour leur accueil chaleureux et pour m'avoir intégrée rapidement dans l'entreprise.

Toutes ces personnes ont contribué, par leur disponibilité et leur bonne humeur, à rendre mon stage enrichissant et motivant.



## Table des matières

Remerciements .....	3
Introduction .....	7
Chapitre 1 : Mission et objectifs.....	9
1-1 Contexte global et problématique .....	9
1-1-1 Observations des déformations de surface.....	9
1-1-2 Apport des images satellites haute résolution spatiale.....	9
1-1-3 Contraintes des images satellites très haute résolution spatiale .....	10
1-2 Etat de l'art .....	11
1-2-1 Utilisation d'un MNT local.....	11
1-2-2 Réalisation d'un MNT à partir des images d'observation .....	12
1-2-3 Mesure de déformations dans le milieu industriel .....	12
1-2-4 Pas de solution généralisable pour les images THR .....	13
1-3 Objectifs .....	13
Chapitre 2 : Méthode de mesure.....	15
2-1 Méthode développée lors du PFE .....	15
2-1-1 Cas sans déplacement .....	15
2-1-2 Cas avec déplacement.....	17
2-1 Lien entre la parallaxe transverse et le déplacement.....	18
2-2 Outils d'analyse.....	22
2-2-1 Logiciels .....	22
2-2-2 Programmes IDL .....	30
Chapitre 3 : Expérimentation .....	32
3-1 Protocole expérimental .....	32
3-1-1 Distance de travail .....	33
3-1-2 Ouverture du diaphragme et profondeur de champ .....	33
3-1-3 Angles d'incidence.....	35
3-2 Réalisation de l'expérience .....	36
3-3 Traitement des images .....	37
3-3-1 Qualité des images acquises .....	37
3-3-2 Choix des images .....	39
3-4 Analyse des résultats .....	41
3-4-1 Analyse des images issues de l'appareil fixe .....	41
3-4-2 Corrélation .....	41
3-4-3 Déplacements calculés .....	43
3-4-4 Conclusion .....	44
Chapitre 4 : Simulations .....	45
4-1 Principe et objectif .....	45
4-2 Mise en place .....	45
4-2-1 Prises de vue .....	46

4-2-2 Points objets.....	46
4-2-3 Déplacements.....	47
4-2-3 Bruit de mesure.....	47
4-3 Résultats .....	49
4-3-1 Paramètres testés.....	49
4-3-2 Résultats sur deux situations de base .....	49
4-3-3 Analyses des influences des paramètres testés .....	51
4-3-4 Conclusion .....	55
Conclusion et perspectives .....	56
Conclusion.....	56
Perspectives .....	58
Bibliographie.....	60

## Introduction

Le Commissariat l'Energie Atomique et aux Energies alternatives(CEA) est un organisme de recherche public français implanté sur neuf sites en France. Les principaux centres d'études sont Saclay (Ile-de-France), Cadarache (Provence) et Grenoble (Isère). Il fut créé en 1945 par ordonnance du Général de Gaulle dans le but de poursuivre des recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans les domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale.

Le CEA, dont le statut est celui d'un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), intervient dans trois grands domaines : l'énergie, les technologies pour l'information et la santé, la défense et la sécurité.

Il compte actuellement près de 16 000 salariés pour un budget de 3,9 milliards d'euros (Chiffres de 2009. Source : <http://www.cea.fr.>). Il est divisé en cinq grandes directions opérationnelles (par ordre décroissant d'effectifs) :

- Direction de l'Energie Nucléaire,
- Direction des Applications Militaires
- Direction de la Recherche Technologique
- Direction des Sciences de la Matière
- Direction des Sciences du Vivant.

Le site de Bruyères-le-Chatel est l'un des quatre centres de la Direction des Applications Militaires (DAM), il fait partie de la DAM - Ile-de-France.

Le Laboratoire Télédétection, Surveillance, Environnement (LTSE) fait partie du Département Analyse, Surveillance, Environnement (DASE). La mission de ce département s'articule autour des trois grands axes suivants :

- Surveillance du respect des traités internationaux

Le DASE participe à la lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme, notamment en mettant son expertise au service de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et de l'Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires (OTICE). Le système de vérification de l'OTICE prévoit en particulier un réseau de surveillance international qui comportera à terme 321 stations, dont les enregistrements seront transmis en temps réel à un centre international situé à Vienne (Autriche), chargé de leur analyse.

- Surveillance de l'environnement :

Le département est également chargé de détecter tout évènement sismique, de le localiser rapidement, d'en calculer la magnitude et d'émettre une alerte à destination des pouvoirs publics. Ses activités ne se limitent pas à la détection, mais comprennent également des études de détermination du risque sismique pour des zones géographiques données. Un travail de surveillance similaire est également effectué pour prévenir d'éventuels tsunamis.

Les compétences du DASE en matière de détection des radionucléides sont elles aussi mises à profit à des fins de surveillance et de protection de l'environnement. Il s'agit principalement de la réalisation d'études d'impacts des activités liées au nucléaire (normes de rejets liquides et gazeux) et d'études de pollution des sols et de migration de polluants, non seulement radioactifs mais également chimiques tels que les métaux lourds.

- Recherches fondamentales en sciences de la Terre :

Afin d'assurer leurs missions opérationnelles et d'anticiper les besoins à venir, les équipes du DASE mènent des recherches fondamentales dans le domaine des sciences de la Terre et de l'environnement comme dans des disciplines connexes telles que la sismologie, la géologie, l'électromagnétisme, le traitement du signal (sismique, infrasons, hydroacoustique).

# Chapitre 1 : Mission et objectifs

## 1-1 Contexte global et problématique

### 1-1-1 Observations des déformations de surface

Dans des contextes de déformations de surface, lors d'évènements tels que les séismes, glissements de terrain, déplacements de glaciers ou de dunes, les mesures précises des déplacements terrain constituent un complément primordial aux mesures géodésiques et sismologiques dans l'étude des mécanismes mis en jeu. En effet, l'analyse de ces déformations permet de mieux comprendre les causes de l'évènement. Par exemple, un séisme provoque généralement des failles et des déformations terrain susceptibles de fournir d'importantes informations sur les mécanismes sismiques.

Malheureusement, les mesures in situ présentent des résultats limités. Elles nécessitent la présence de marqueurs, c'est à dire d'endroits où la déformation est visible et le déplacement mesurable ; un marqueur peut être par exemple une route scindée en deux par un séisme (voir Figure 1Figure 1 : Exemple de marqueur terrain : la clôture a été séparée en deux par le déplacement du terrain.). Or il n'est pas toujours évident de trouver des marqueurs. De plus, les failles peuvent avoir des géométries complexes, et certaines zones sont déformées sans qu'il y ait rupture, il est alors impossible de repérer des marqueurs sur le terrain. Ces mesures de déplacement en un nombre limité de points ne sont donc pas toujours assez représentatives des réelles déformations de surface. D'autre part, il n'est généralement pas possible de mesurer la composante du déplacement perpendiculaire à la faille. Les mesures in situ manquent ainsi de précision.

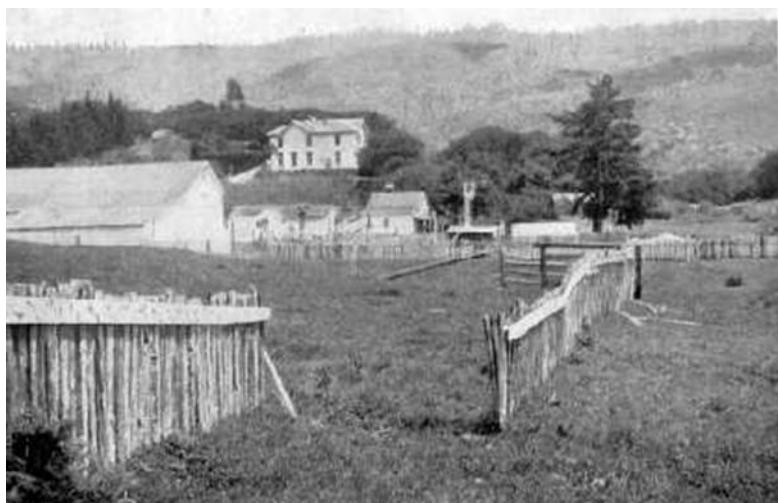


Figure 1 : Exemple de marqueur terrain : la clôture a été séparée en deux par le déplacement du terrain.

### 1-1-2 Apport des images satellites haute résolution spatiale

Les images satellites permettent de s'affranchir de ces contraintes puisqu'elles fournissent des données sur une large zone. La technique consiste à comparer deux images, l'une acquise avant un évènement et l'autre après. Une corrélation entre les deux images permet de mesurer le déplacement de chaque pixel, et donc de chaque point de la zone photographiée. Non seulement la présence de marqueurs n'est plus indispensable, mais les mesures sont réalisées sur toute la zone d'emprise de l'image, et non sur quelques points isolés. On obtient ainsi un champ des déplacements de surface.

Les images haute résolution spatiale, comme celles issues de la constellation SPOT (10-20m), sont exploitées dans ce but depuis des années. De nombreuses études menées sur des images optiques haute résolution ont montré l'efficacité de cette technique (Dominguez et al., 2003 ; Michel et Avouac, 2002 ; Klinger et al., 2005). Une corrélation subpixellique appliquée sur des images d'une résolution spatiale de 10 à 20m permet de mesurer les déplacements terrain avec une précision de 0,1 pixel, soit 1 à 2m (Binet et Bollinger, 2005 ; Michel et Avouac, 2002 ; Dominguez et al., 2003 ; Feigl et al., 2002). Malgré ces résultats très intéressants, une haute résolution spatiale se révèle insuffisante pour mesurer des déplacements inférieurs à 1m, présentant ainsi un intérêt limité pour l'analyse les détails des déformations sismiques et la caractérisation de séismes de faible amplitude (Ayoub et al., 2009).

### 1-1-3 Contraintes des images satellites très haute résolution spatiale

Depuis 1999, date de lancement du satellite Ikonos, de nouveaux satellites très haute résolution (THR) spatiale ont vu le jour : GeoEye-1, WorldView, QuicBird ou encore Pléiades. Ces satellites ont tous une résolution spatiale inférieure au mètre en mode panchromatique et de 2 à 3m en mode multispectral (voir Tableau 1).

Satellite	Mode d'acquisition		Résolution spatiale (m)
	panchromatique	multispectral	
Ikonos	0.80	3.20	
GeoEye-1	0.50	2.00	
QuickBird2	0.61	2.44	
WorldView1	0.50		
Worldview2	0.46	2.00	
Pleiades	0.50	2.00	

Tableau 1: Résolution spatiale des satellites THR

Source : [http://www.gim.be/C12574AD00426BEC/\\_/6626A938C60147B1C12574CC0054F8D3?OpenDocument](http://www.gim.be/C12574AD00426BEC/_/6626A938C60147B1C12574CC0054F8D3?OpenDocument)

Avec une telle résolution on pourrait s'attendre à améliorer nettement la précision sur la mesure de déformations terrain. Cependant, il n'est pas possible d'appliquer directement la méthode utilisée avec les images haute résolution aux images très haute résolution spatiale. En effet, non seulement les conditions d'acquisition sont différentes, mais de plus on ne dispose pas des mêmes données complémentaires dans les deux cas.

Dans le cas des images haute résolution, il est possible de choisir la position et l'orientation du satellite au moment de l'acquisition. Pour de meilleurs résultats, il est judicieux de demander deux images obtenues depuis la même prise de vue. L'angle entre les axes optiques des images est alors faible. Pour évoquer cet angle, on parle le plus souvent du rapport B/H, B étant la distance entre les deux sommets des prises de vue et H la hauteur des sommets. Lorsque ce ratio est faible cela minimise la parallaxe stéréoscopique. Afin d'éliminer totalement cette parallaxe due au relief, les images sont corrigées puis orthorectifiées à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La différence restante entre les deux images caractérise dès lors uniquement les déplacements terrain. Une corrélation subpixellique des images permet enfin de mesurer ces déformations de surface.

Avec les satellites très haute résolution, il n'est plus possible de commander la prise de vue des images. Comme les satellites sont équipés de capteurs orientables, ils peuvent acquérir des images de la même zone depuis des positions bien différentes. On a alors de grandes chances d'avoir un angle fort entre les prises de vue. Or, un fort B/H engendre de fortes parallaxes stéréoscopiques.

Par ailleurs, dans le cas d'images haute résolution, il est possible d'utiliser les MNT SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) pour orthorectifier les images. Ces derniers ont été réalisées en février 2000 par les agences américaines de la NASA et la NGA qui ont recueilli des données altimétriques en utilisant l'interférométrie radar sur près de 80% des terres émergées. Les MNT de la version SRTM3 proposent une couverture mondiale et ont une résolution de 3 secondes d'arc, soit 93m à l'Équateur (voir Tableau 2).

MNT SRTM	Résolution	Couverture
SRTM1	une seconde d'arc (31 m à l'Équateur)	États-Unis et leurs dépendances
SRTM3	trois secondes d'arc (93 m à l'Équateur)	couverte mondiale
SRTM30	30 secondes d'arc (926 m à l'Équateur)	couverte mondiale

Tableau 2 : Résolution et couverture des différents SRTM  
 (Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Shuttle\\_Radar\\_Topography\\_Mission](http://fr.wikipedia.org/wiki/Shuttle_Radar_Topography_Mission))

Les satellites SPOT 1, 2, 3, 4 ont une résolution spatiale de 10m en mode panchromatique et 20m en mode multispectral et les satellites Landsat atteignent, au mieux, une résolution spatiale de 15m en mode panchromatique et 30m en mode multispectral (ASTER 15 à 90m). La résolution du MNT SRTM3 suffit dans de nombreux cas pour l'orthorectification des images haute résolution. Comme le maillage du MNT est moins précis que la résolution des images il faut interpoler les altitudes sur quelques pixels (9 à 3 pixels) ce qui peut rendre le MNT inutilisable dans des conditions de relief fort et variable ou encore au niveau des villes. Malgré cela, le SRTM fournit dans la plupart des cas une résolution suffisante pour la correction de la parallaxe stéréoscopique. On peut alors orthorectifier les images, puis réaliser une corrélation subpixellique des images avant/après et ainsi mesurer à 0.1 pixel près les déplacements terrain. Malheureusement, la précision du SRTM est inadaptée au traitement d'images très haute résolution. En effet, la taille moyenne d'un pixel étant d'un mètre il faudrait interpoler les altitudes des pixels sur environ 100 pixels. On ne peut dans ce cas garantir la justesse des altitudes utilisées pour orthorectifier chaque pixel de l'image.

Avec des images satellites très haute résolution on se retrouve dans une situation avec d'importantes parallaxes stéréoscopiques à cause du fort B/H et une absence de MNT suffisamment précis pour corriger ces parallaxes. Il n'est donc pas possible de distinguer, lors de la corrélation subpixellique, quelle part de la disparité du pixel est liée au relief et quelle part est la conséquence d'une déformation terrain. Pour pouvoir utiliser la même méthode qu'avec les images haute résolution, il faudrait disposer d'un MNT d'une précision supérieure à celle du SRTM, et plus proche de celle de l'image, ce qui est rarement le cas.

L'objectif du PFE était donc de mettre en œuvre une nouvelle méthode de mesure de déformation terrain avec des images très haute résolution, qui tienne compte des conditions d'acquisition particulières de ces images et de l'absence de MNT.

## 1-2 Etat de l'art

De nombreuses études ont été menées sur les mesures de déplacements grâce à des images optiques, qu'il s'agisse d'images satellites, aériennes ou bien terrestres. Nous nous sommes intéressés de près aux méthodes exploitant des images très hautes résolutions puisqu'elles constituent l'objet de mon PFE.

### 1-2-1 Utilisation d'un MNT local

Ayoub et al., 2009 ont exploité deux photographies aériennes d'une résolution de 1m afin d'étudier les déformations de surface provoquées par le séisme de Landers en Californie, en 1992 (Ayoub et al., 2009). Les images ont été réalisées par le National Aerial Photography Program, en 1989 et 1995.

Les auteurs de l'étude ont développé une technique permettant d'orthorectifier conjointement deux images. Cela leur permet d'obtenir des images géoréférencées et orthorectifiées dans le même système, avec une précision relative d'environ 1/3 de pixel. Ils ont pour cela utilisé le SRTM1, caractérisé par une résolution d'une seconde d'arc, soit 31m à l'Équateur. Malheureusement, ce MNT ne couvre que

les Etats-Unis et leurs dépendances, il n'est donc pas possible d'adapter cette méthode à l'échelle planétaire.

De plus, les séries de photographies de 1989 et 1995 ont été réalisées de telle sorte que les centres optiques soient quasiment superposables d'une campagne à l'autre. Les auteurs ont ainsi considéré que, les sommets des images étant très proches d'une image à l'autre, les effets de parallaxe stéréoscopique étaient négligeables. Avec cette configuration particulière, ils ont réussi à mesurer des déplacements de quelques dizaines de centimètres.

### 1-2-2 Réalisation d'un MNT à partir des images d'observation

En l'absence de MNT existant suffisamment précis, une technique consiste à réaliser son propre MNT avec les images utilisées pour mesurer les déplacements (Käab, 2002, Delacourt et al., 2004). Käab a ainsi utilisé deux couples stéréoscopiques multitemporels pour élaborer deux MNT d'une même zone, à deux époques différentes.

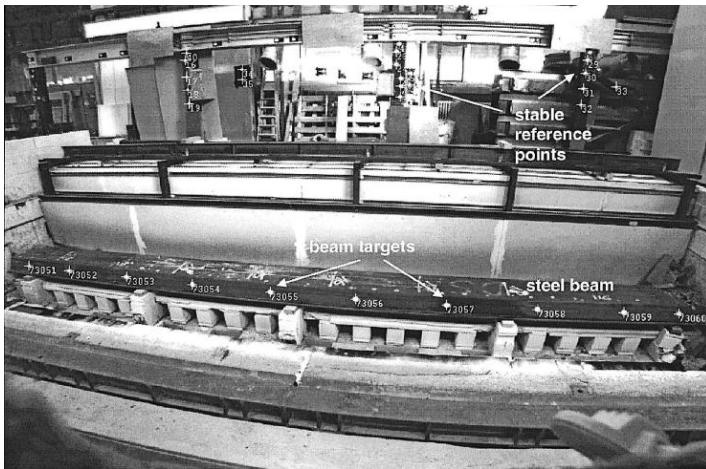
Il a ainsi étudié des couples de photographies aériennes du glacier rocheux de Muragl, dans les Alpes suisses, réalisées en 1981 et 1994. Dotées d'une résolution de 0.2m, ces images lui ont servi à construire un MNT de la zone pour chaque date. Ensuite, il a pu orthorectifier les photographies de 1981 avec le MNT de cette année et celles de 1994 avec le second MNT. La comparaison des orthoimages a ensuite permis la mesure de déplacement du glacier.

Avec cette méthode, une précision de 1 pixel, soit 0.2m, est obtenue pour la mesure de déformation. Le principal inconvénient de cette technique est le rééchantillonnage accompagnant l'orthorectification. En effet, il implique un risque de perte d'information et l'on constate que si l'on applique cette méthode à des images satellites très haute résolution (2 à 3m), on obtiendra une précision de 2 à 3m, comparable à celle atteinte actuellement avec les images satellites haute résolution. Dans les travaux de Delacourt et al. la corrélation entre deux orthoimages atteinte est de 0,1 pixel. Toutefois il n'est pas précisé la perte de précision résultant du rééchantillonnage de l'orthorectification.

### 1-2-3 Mesure de déformations dans le milieu industriel

La photogrammétrie remporte également un certain succès dans le milieu industriel, car elle permet de réaliser des mesures de déplacement 3D avec une haute précision et sans contact avec l'objet à observer. Elle est donc utilisée dans un large panel d'applications telles que l'industrie automobile (contrôle des formes des véhicules, crash-test...), aérospatiale (mesures des plates-formes, des antennes...) ou bien dans le domaine de la construction (barrage, usine, pont...) (Luhmann, 2010).

Fraser et Riedel, 2000 ont ainsi mesuré la déformation thermique d'une poutre en acier. Trois appareils ont été placés à quelques mètres de la poutre, sur laquelle étaient disposées une dizaine de cibles (voir Figure 2). Un second réseau de cibles stables avait été mis en place à l'arrière du dispositif afin de servir de référence. Pendant que la température de la poutre était progressivement abaissée de 1100°C à 50°C, les appareils réalisaient des simultanément des photographies à différentes époques. La position des prises de vue ne changeait donc pas entre les images d'une série temporelle issue d'un même appareil. Il était ainsi possible de superposer ces images et de mesurer directement les déformations sans être gêné par une parallaxe stéréoscopique. L'expérience a permis d'obtenir des mesures de déformation d'une précision de 0.2 pixel.



**Figure 2 : Dispositif de mesure de déformation thermique d'une poutre (Fraser et Riedel, 2000)**

Dans le même ordre d'idée, Bernstone et Heyden, 2009 ont étudié un système de surveillance de fissures au niveau de structures en béton. Une séquence d'images est acquise en un certain laps de temps afin d'étudier l'évolution de la fissure. Dans cette étude, les appareils photographiques restent également en place tout le temps de l'acquisition de la séquence d'images, si bien que le problème de parallaxe stéréoscopique n'apparaît pas non plus.

#### 1-2-4 Pas de solution généralisable pour les images THR

Les différentes études menées sur les mesures de déplacements par images optiques proposent des solutions intéressantes, mais qui ne sont pas applicables dans tous les cas aux images satellites très haute résolution. Certains travaux utilisent des MNT locaux suffisamment précis (Michele et Briole, 2007) ; malheureusement il n'est pas possible d'en trouver pour chaque région de la Terre. De plus, le MNT correspond à une période donnée. Ainsi, pour au moins une des images multitemporelles il ne sera pas exactement représentatif du relief à l'époque où a été acquise l'image. Cela peut conduire à des erreurs lors de l'orthorectification, dont l'importance sera liée à l'étendue des changements de relief.

D'autres méthodes ont été développées, qui préconisent de réaliser des images avec des prises de vue identiques, afin d'éliminer la parallaxe stéréoscopique. S'il est envisageable de le mettre en place pour des images aériennes (Ayoub et al., 2009), dans le milieu de l'industrie (Fraser et Riedel, 2000, Bernstone et Heyden, 2009), voire pour des images satellites haute résolution, il n'est pas possible de se trouver dans cette configuration lors de l'acquisition d'images satellites très haute résolution.

La méthode la plus adaptée semble être celle qui consiste à construire deux MNT à l'aide de deux couples stéréoscopiques. Il se pose toutefois le problème du rééchantillonnage lors de l'orthorectification, qui risque d'altérer la précision.

### 1-3 Objectifs

Les problèmes inhérents aux images satellites très haute résolution n'étant pas tous résolus, l'objectif principal du PFE est de développer une nouvelle méthode de mesure de déformations. Cette dernière doit permettre de s'affranchir de la connaissance du relief et doit pouvoir être utilisée lorsque les images multitemporelles ont des prises de vue différentes. Utiliser des images THR aurait un autre avantage que l'amélioration de la résolution : cela permettrait d'avoir des temps de revisite journaliers. En effet, comme la méthode utilisée avec les images HR préconise d'acquérir les images depuis la

même prise de vue, une fois que la première image est acquise, il faut attendre que le satellite repasse exactement au même endroit pour réaliser la seconde image. Or lorsque le satellite repasse une deuxième fois aux alentour de la scène, sa trajectoire n'est pas superposée à celle du passage précédent. Il faut ainsi attendre un cycle orbital complet pour obtenir deux images acquises avec la même prise de vue. Pour les satellites SPOT 1 à 5, ce cycle est de 26 jours, et pour le satellite Landsat 7 il dure 16 jours. Mettre en place une méthode qui ne nécessite pas d'avoir les mêmes prises de vue permettrait aux satellites THR d'acquérir une image dès le deuxième passage aux environs de la scène. Pléiades dispose d'une capacité de revisite quotidienne, il ne pourrait ainsi s'écouler qu'un jour entre les images multitemporelles au lieu de 26 ou 16. Cela permettrait de mesurer les déformations journalières d'un évènement. Ainsi, on pourrait par exemple distinguer les déformations dues à une première secousse principale des déformations dues aux répliques, qui peuvent avoir lieu quelques jours plus tard.

Le stage s'est ainsi organisé en plusieurs étapes. Tout d'abord il a fallut mettre en place la théorie d'une nouvelle méthode. Ensuite, est venue l'écriture des programmes mettant en œuvre cette méthode. Ceux-ci devaient non seulement s'intégrer dans la chaîne de traitement du CEA mais également être adaptés aussi bien à des images satellites qu'aériennes. Enfin, la dernière étape consistait à tester la méthode et les programmes via des expériences terrain et des simulations numériques. L'expérimentation sert notamment à déterminer les contraintes d'utilisation. La simulation permet de réaliser des calculs de sensibilité. Ces tests devaient à la fois vérifier le bon fonctionnement de la méthode, mais aussi évaluer la précision qu'elle pouvait permettre d'atteindre.

Si cette méthode a dans un premier temps été pensée pour répondre aux besoins des traitements des images satellites très haute résolution, elle peut également s'appliquer à des images aériennes ou terrestres.

## Chapitre 2 : Méthode de mesure

Le CEA a mis en place une collaboration avec l'Institut de Physique du globe de paris (IPGP) autour de la problématique de mesure de déformations terrain par imagerie spatiale. Le PFE, qui s'inscrit dans le cadre de cette collaboration, avait pour objectif de mettre en œuvre une nouvelle méthode de mesure de déformation terrain à partir d'images satellites très haute résolution.

### 2-1 Méthode développée lors du PFE

#### 2-1-1 Cas sans déplacement

Lorsque l'on dispose d'un couple d'images du même objet, chaque point de l'objet est présent sur les deux images, mais à des coordonnées pixelliques différentes. On voit sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** que les points images Mi1 et Mi2 du point objet M ont des positions différentes sur chacune des photographies. La distance qui sépare ces deux localisations est appelée la disparité et se mesure en pixel (voir Figure 3). C'est cette quantité qui est mesurée lors de la corrélation d'images et qui permet d'en déduire des informations sur M.

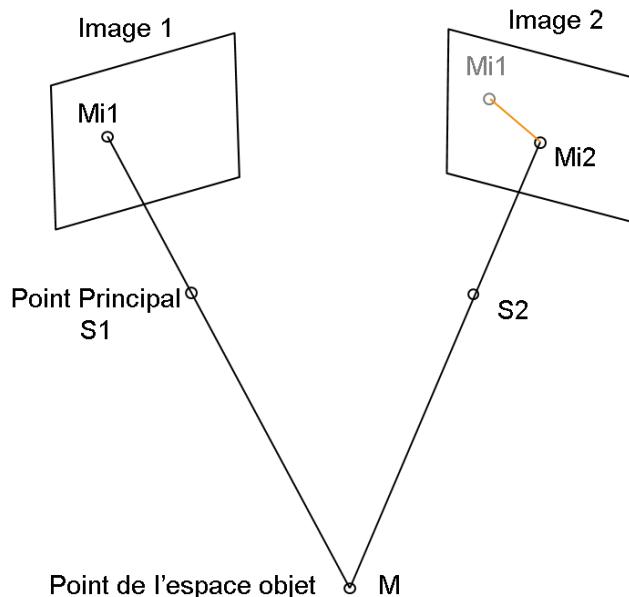


Figure 3 : Couple stéréoscopique. Cas sans déplacement.

Pour un couple d'images représentant un objet immobile, dans des conditions idéales, un point Mi1 de l'image 1 a son point homologue Mi2 de l'image 2 situé sur la droite épipolaire (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La disparité est alors mesurée le long de la droite épipolaire.

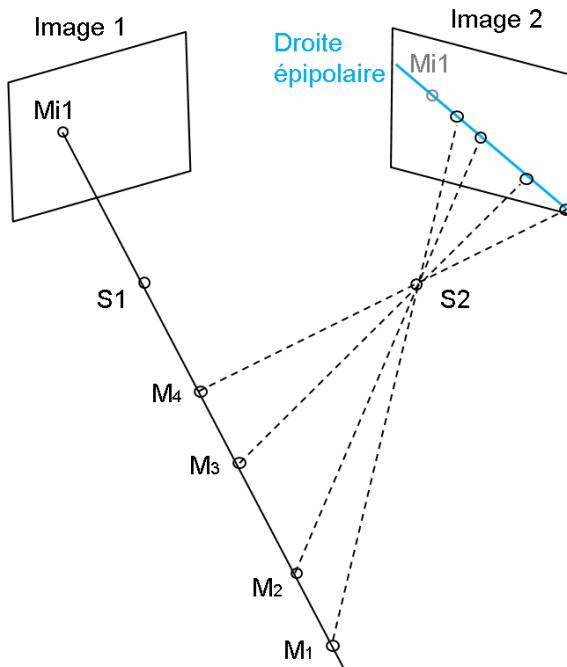


Figure 4 : Droite épipolaire d'un point  $M_i$ .

On sait qu'un point objet ayant pour point image le point  $M_{i1}$  est situé sur la droite ( $S_1M_{i1}$ ). Comme le montre le schéma, le point objet de  $M_{i1}$  peut être  $M_1, M_2, M_3 \dots$ . Ainsi, le point homologue de  $M_{i1}$  est situé sur la projection de la droite ( $S_1M_{i1}$ ) sur la seconde image. Cette projection est la droite épipolaire (en bleu sur le schéma). Le plan défini par les points  $M, S_1$  et  $S_2$  est appelé plan épipolaire.

Toutefois, on ne se trouve jamais dans des conditions idéales ; il y a toujours des erreurs de distorsion radiales et tangentielles qui influent légèrement sur la position des points images. De plus, lors de la corrélation, étape de mise en correspondance des deux images, des erreurs de modélisation de calibration et d'orientation peuvent altérer la mesure de la disparité (voir Figure 5). Ainsi, la disparité calculée est la combinaison d'une composante principale le long de la droite épipolaire et d'éléments inhérents aux différentes erreurs dans la direction épipolaire et dans d'autres directions. Cette composante principale est appelée la parallaxe stéréoscopique. Liée au relief, elle permet de calculer l'altitude du point objet  $M$ . On voit sur la Figure 4 que la parallaxe stéréoscopique est liée au relief car plus le point  $M$  s'éloigne du centre optique  $S_1$ , plus la parallaxe stéréoscopique est petite.

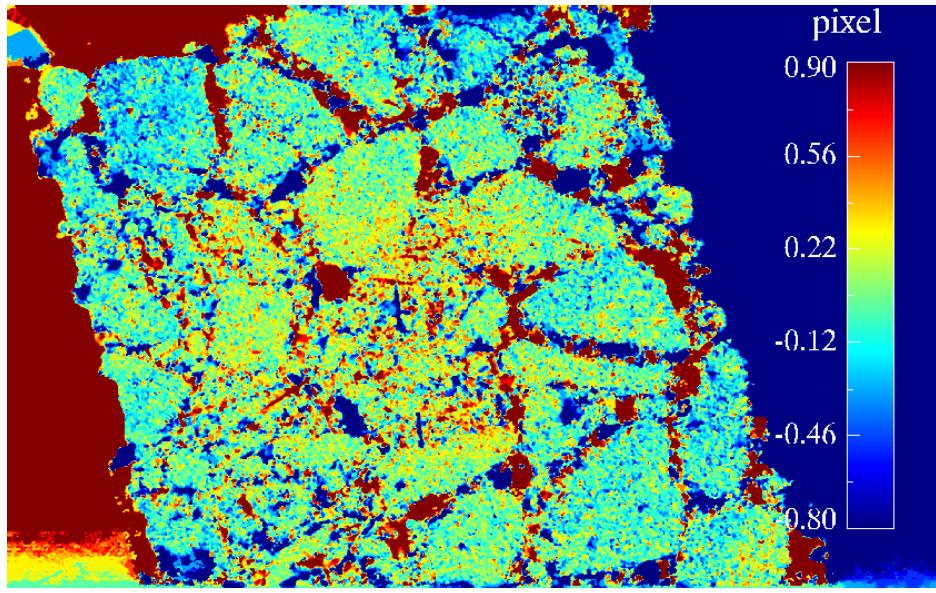


Figure 5 : Exemple de modélisation de distorsions radiales sur la corrélation entre deux images. On distingue des zones concentriques avec, au centre une zone rouge caractérisé par des valeurs d'environ 0.6 pixel, et en s'éloignant une zone jaune, puis une bleue, ayant des valeurs d'environ -0.50 pixel.

### 2-1-2 Cas avec déplacement

Lorsqu'il y a déplacement du point M entre deux acquisitions d'images, Mi2 va également se déplacer sur l'image 2. Si ce mouvement a lieu dans le plan épipolaire de M, Mi2 évoluera le long de la droite épipolaire. Mais dans tous les autres cas, Mi2 ne se trouvera plus sur la droite épipolaire. La disparité obtenue après corrélation sera alors composée de la parallaxe stéréoscopique, de petits éléments liés aux erreurs, mais aussi d'une nouvelle composante due au mouvement de l'objet. Par la suite, la composante de la disparité autre que la parallaxe stéréoscopique sera appelée la parallaxe transverse. Ce terme provient du logiciel MicMac utilisé par le CEA pour le calcul de corrélation, qui distingue composante stéréoscopique et composante transverse.

Utilisé pour la mise en correspondance des images, ce logiciel a été développé par l'IGN. Lors de la corrélation, il cherche chaque paire de pixels homologues et calcule leur disparité en deux dimensions : il calcule une composante le long de la droite épipolaire et une composante selon la perpendiculaire à l'épipolaire. La première composante est la parallaxe stéréoscopique, la seconde la parallaxe transverse (voir Figure 6). On nommera cette direction, la direction transverse.

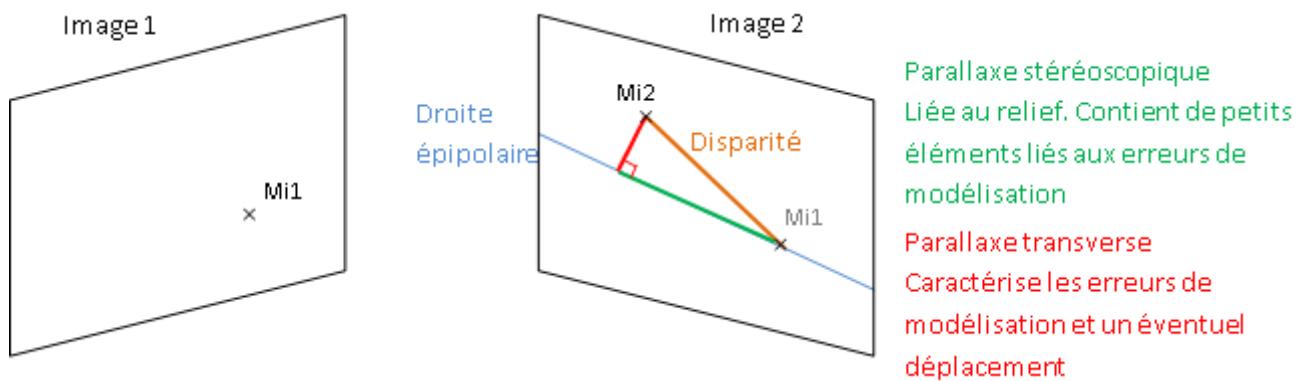


Figure 6 : Détails des composantes de la disparité

On constate que cette parallaxe transverse est liée au déplacement du point M, car nous avons vu que, dans un cas sans déplacement, la disparité est principalement mesurée le long de la droite épipolaire. Ainsi, si la calibration et l'orientation sont suffisamment bien modélisées et que les erreurs de distorsion sont corrigées, on dispose d'une observation liée au déplacement de l'objet.

Lors du PFE, nous avons cherché à étudier le lien entre cette parallaxe et le déplacement afin de comprendre s'il était possible de calculer le déplacement à partir de cette observation.

## 2-2 Lien entre la parallaxe transverse et le déplacement

La nouvelle méthode que nous avons développée repose sur l'exploitation de la parallaxe transverse. Pour déterminer le lien entre cette parallaxe et le vecteur déplacement d'un point, nous avons étudié le cas général d'un objet ayant bougé entre deux acquisitions d'images.

On considère un point objet M, qui effectue un déplacement  $d$  (voir Figure 7). On note  $M'$  le point localisant sa position après déplacement. Deux images sont réalisées, l'image 1, lorsque l'objet est en M, l'image 2, après qu'il se soit déplacé en  $M'$ . Soient  $S_1$  et  $S_2$  les centres optiques (ou sommets) respectifs des images. M est projeté en  $M_{i1}$  sur l'image 1 et en  $M'_{i2}$  sur l'image 2 et  $M'$  en  $M'_{i2}$  sur l'image 2. On appelle rayon perspectif de M la droite passant par M et par le sommet d'une image.  $(S_1M)$  et  $(S_2M)$  sont ainsi les rayons perspectifs de M pour les images 1 et 2.

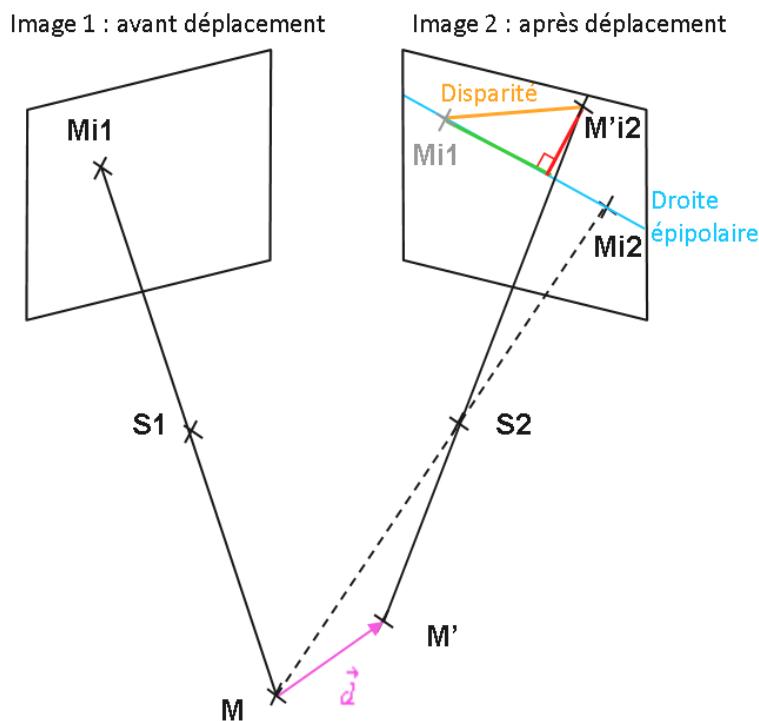


Figure 7 : Couple stéréoscopique d'un point M s'étant déplacé en  $M'$

On définit un repère normalisé tel que :

- $u_1$  vecteur directeur de  $(S_1M)$
- $u_2$  vecteur directeur de  $(S_2M)$
- $u_3 = u_1 \wedge u_2$   
(voir Figure 8)

Les vecteurs  $u_1$  et  $u_2$  définissent le plan épipolaire car ils sont les vecteurs directeurs des rayons perspectifs de M.

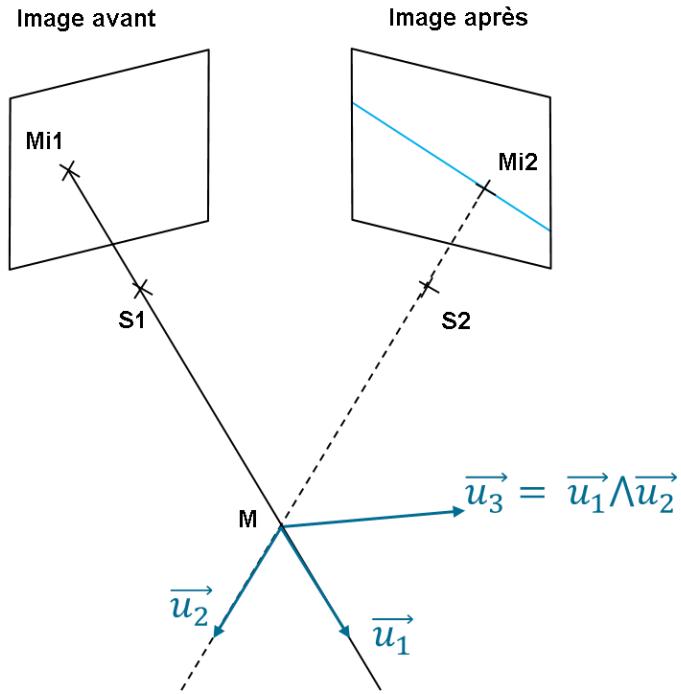


Figure 8 Repère  $(u_1, u_2, u_3)$

Décomposons le vecteur déplacement dans ce repère. On a :

$$d = d_1 \cdot u_1 + d_2 \cdot u_2 + d_3 \cdot u_3 \quad [1]$$

Soit

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

Si le déplacement a lieu selon  $u_1$ , alors  $M'$  est situé sur le rayon perspectif ( $S_1M$ ). Son image sur l'image 2 est située donc sur la droite épipolaire. La disparité est alors mesurée uniquement le long de la droite épipolaire, la parallaxe transverse est nulle (voir Figure 9). **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

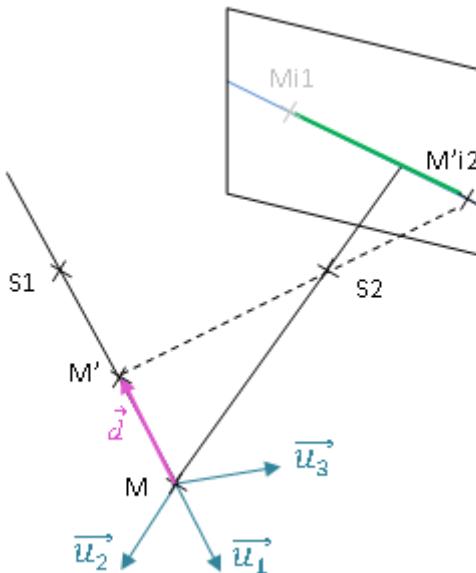


Figure 9 : Déplacement selon  $u_1$

De même, si le déplacement est réalisé selon la droite (S2M), M'i2 est situé en Mi2, donc sur la droite épipolaire et la parallaxe transverse est nulle (voir Figure 10).

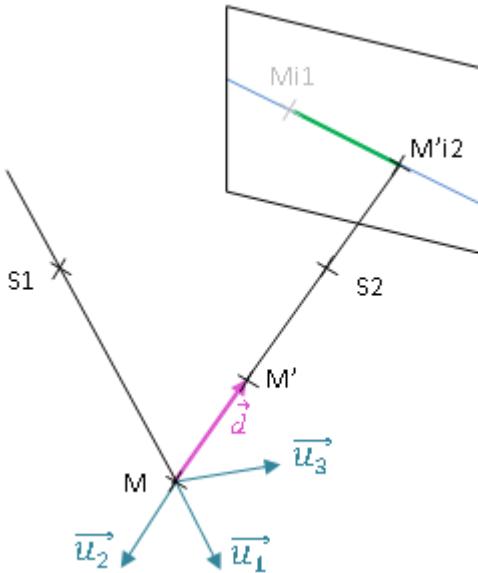


Figure 10 : Déplacement selon  $u_2$

Ainsi, la projections de  $d_1$  sur l'image 2 est située le long de la droite épipolaire et celle de  $d_2$  est nulle. La parallaxe transverse est donc uniquement liée à  $d_3$ .

On a donc :

$$\text{proj } d_{im2} = \text{proj } d_{1 im2} + \text{proj } d_{2 im2} + \text{proj } d_{3 im2} \quad [2]$$

Avec  $\text{proj}(v)_{im2}$  la projection de v sur l'image 2

Soit :

$$\text{proj } d_{im2} = \text{proj } d_{1 im2} \in \text{droite épipolaire} + 0 + \text{proj } d_{3 im2} \quad [3]$$

Pour l'instant, on ne sait pas selon quelle direction de l'image est située la projection de  $d_3$ . Montrons que la projection de  $d_3$  est située dans la direction transverse, c'est-à-dire dans la direction perpendiculaire à l'épipolaire.

Les vecteurs  $u_1$  et  $u_2$  définissent le plan épipolaire.  $u_3$  est orthogonal à  $u_1$  et  $u_2$ , donc orthogonal au plan épipolaire.

Ainsi,  $\forall v \in \text{Plan}_{\text{épиполaire}}, v \perp u_3 \quad [4]$

$\text{Plan}_{\text{éпиполaire}} \cap \text{Plan}_{\text{image2}} = \text{Droite}_{\text{éпиполaire}}$ , donc  $\text{Droite}_{\text{éпиполaire}} \in \text{Plan}_{\text{éпиполaire}}$

$\text{proj } d_{1 im2}$  est sur la droite épipolaire donc  $\text{proj } d_{1 im2} \in \text{Plan}_{\text{éпиполaire}}$

Par conséquent :  $\text{proj } d_{1 im2} \perp u_3 \quad [5]$

Par ailleurs,  $u_2$  est orthogonal au  $\text{Plan}_{\text{image2}}$ . Même si cette propriété n'est rigoureusement vérifiée qu'au centre de l'image, on peut la considérer vraie pour toute l'image.

Comme  $u_3 \parallel u_2$ ,  $u_3$  est parallèle au  $\text{Plan}_{\text{image2}}$ . Par conséquent,  $\text{proj } d_{3 im2}$  est parallèle à  $u_3$ .

D'après [5], on en déduit que :  $\text{proj } d_1 \text{ }_{\text{im}2} = \text{proj } d_3 \text{ }_{\text{im}2}$

Or, la projection de  $d_1$  sur l'image 2 est dans la direction de la droite épipolaire ; la projection de  $d_3$  est donc bien selon la perpendiculaire à l'épipolaire, c'est-à-dire selon la direction transverse.

Ainsi, l'équation [3] devient :

$$\text{proj } d \text{ }_{\text{im}2} = \text{proj } d_1 \text{ }_{\text{im}2} \in \text{droite épipolaire} + 0 + \text{proj } d_3 \text{ }_{\text{im}2} \in \text{droite transverse} \quad [6]$$

Soit :

$$\text{proj } d \text{ }_{\text{im}2} = \text{parallaxe stéréoscopique} + 0 + \text{parallaxe transverse} \quad [7]$$

Nous pouvons donc affirmer que la parallaxe transverse est égale à  $d_3$ , c'est-à-dire la projection du déplacement selon le vecteur  $u_3$ .

Nous avons vérifié la justesse de cette théorie en réalisant un programme IDL. Nous avons calculé séparément la projection d'un déplacement selon le vecteur  $u_3$  et la parallaxe transverse et nous avons trouvé les mêmes valeurs.

## 2-2 Inversion du déplacement

Lorsque le corrélateur calcule la parallaxe transverse, il nous fournit ainsi une projection du déplacement de chaque point photographié. Pour un couple i d'images avant/après, on obtient donc :

$$d \cdot u_{3_i} = px2_i \quad [8]$$

avec  $d$  : le vecteur déplacement

$u_{3_i}$  : le vecteur directeur unitaire de la direction de projection du couple i

$px2_i$  : la parallaxe transverse du couple i

(voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

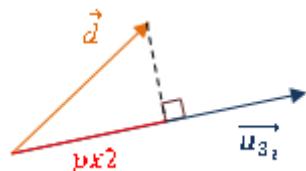


Figure 11 : projection du déplacement selon  $u_3$

Notons :  $d = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  et  $u_{3_i} = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix}$ , avec  $u_{3_i}$  vecteur unitaire

Ainsi, en remplaçant dans l'équation [8] on obtient :

$$a_i \cdot x + b_i \cdot y + c_i \cdot z = px2_i \quad [9]$$

On a alors un système d'une équation à trois inconnues (x, y et z). Ce système est sous-déterminé, on ne peut le résoudre.

Lorsqu'on dispose de trois couples avant/après, on obtient un système de trois équations à trois inconnues :

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{y} + \mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{z} &= \mathbf{px2}_1 \\ \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}_2 \cdot \mathbf{y} + \mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{z} &= \mathbf{px2}_2 \\ \mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}_3 \cdot \mathbf{y} + \mathbf{c}_3 \cdot \mathbf{z} &= \mathbf{px2}_3 \end{aligned} \quad [10]$$

Notons alors sous forme matricielle :

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}, \quad P2 = \begin{pmatrix} px2_1 \\ px2_2 \\ px2_3 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad d = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Une inversion avec la méthode des moindres carrés donne le déplacement  $d$  avec la relation matricielle suivante :

$$\mathbf{d} = \mathbf{A}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{M} \quad [11]$$

Les trois composantes de  $d$  sont alors déterminées. Disposer de plus de couples permet de mieux contraindre le système  $\mathbf{d} = \mathbf{A}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{M}$  [11], ce qui ne peut qu'améliorer la précision sur le résultat. Il est possible de pondérer cette inversion en fonction de la qualité de la parallaxe fournie par chaque couple. On peut par exemple mettre un poids plus faible aux observations les plus bruitées.

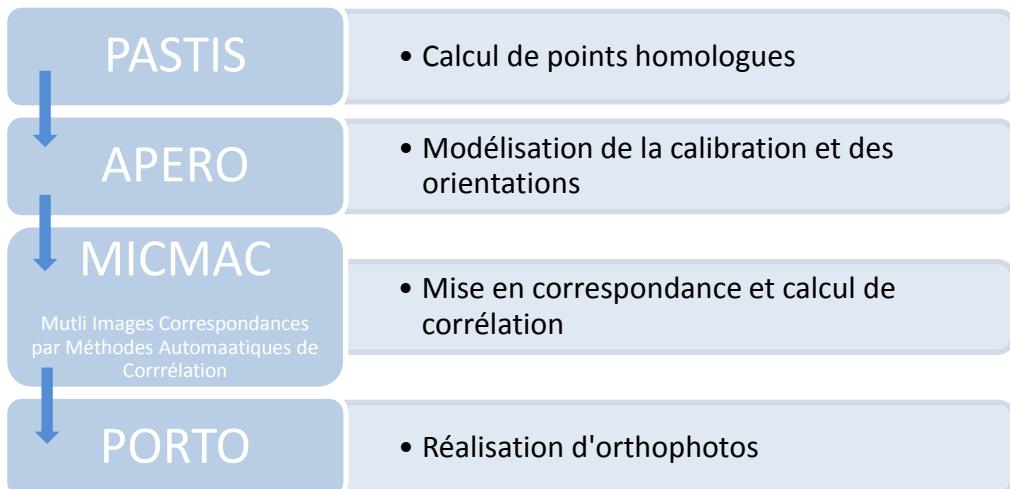
Si un couple d'images avant/après déformation fournit une composante du déplacement, il suffirait en théorie de 3 couples avant/après pour reconstituer le déplacement 3D et de 2 couples pour retrouver un déplacement 2D. Bien sûr, la possession d'images supplémentaires permettrait de mieux contraindre le système, et donc d'obtenir une mesure plus juste du déplacement.

## 2-4 Outils d'analyse

Une fois, la théorie en place, il s'agit de créer les programmes la mettant en œuvre. Ces programmes ont été écrits en langage IDL, particulièrement bien adapté au traitement et à la visualisation de données. Ils ont dû être intégrés dans le système de traitement d'images du CEA afin d'être adaptés aux résultats fournis par ces logiciels. Dans le cas des images optiques, le CEA se sert du package de traitement multi-images de l'IGN, qui comprends notamment les logiciels MicMac, Apero et Tapioca. Ces derniers permettent de réaliser la spatiotriangulation d'un bloc d'images et la mise en correspondance des images. Dans cette partie, Je vais tout d'abord décrire les outils d'analyses du CEA afin de présenter le contexte dans lequel les programmes ont été écrits, avant d'expliquer les programmes.

### 2-2-1 Logiciels

Pour le traitement d'images optiques, le CEA utilise l'ensemble de logiciels de l'IGN développés par Marc Pierrot Deseilligny. Ce package, qui fonctionne sous Linux, permet la modélisation 3D à partir d'un jeu d'images et la génération d'orthoimages via quatre outils principaux : Pastis, Apero, MicMac et Porto (voir Figure 12).



**Figure 12 : Processus de traitement d'images avec les outils logiciels de l'IGN**

D'autres logiciels secondaires ont été développés pour créer des nuages de points 3D, réaliser des masques ou bien de faire des conversions des images. Ces outils ont été conçus pour être utilisés dans un large panel d'applications et ont permis de réaliser des travaux dans différents contextes :

- Réalisation de MNT d'une zone rurale à partir d'une paire d'images satellites
- Réalisation de MNT d'une zone urbaine à partir d'images aérienne à haute résolution
- Détection de mouvement de terrain
- Modélisation 3D d'objets tels que des sculptures ou de scènes intérieures
- calcul de points homologues pour la superposition d'images multi canaux ...

Cette généralisation des applications a l'inconvénient de complexifier la paramétrisation. Pour certains de ces outils les paramètres peuvent être indiqués directement en ligne de commande, mais pour d'autres plus complexes, comme MicMac, la paramétrisation doit être spécifiée dans un fichier xml.

J'ai appris à me servir de ces logiciels avec un jeu d'images réalisées au début du PFE. J'ai photographié un ensemble de gravas, décalé un caillou de quelques millimètres puis j'ai à nouveau pris des photographies de la scène. Le but étant seulement de me familiariser avec les logiciels, aussi nous n'avons pas mesuré avec précision la valeur du déplacement. Je vais décrire le fonctionnement de ces logiciels à travers les résultats de cette première expérimentation.

### PASTIS/TAPIOCA

Cet outil permet de calculer les points homologues entre les paires d'un ensemble d'images. Complexé, il nécessite de spécifier la paramétrisation dans un fichier xml. Cependant, afin de simplifier le traitement d'image, l'outil Tapioca a été développé. Ce dernier est une interface de Pastis pour laquelle les paramètres sont à indiquer en ligne de commande. Tapioca suffit dans la plupart des cas, ce qui évite d'avoir à écrire un fichier de paramètres complet.

### APERO/TAPAS

Apero est un outil qui permet de déterminer la calibration, l'orientation interne et externe et la position d'un jeu de prises de vue. A partir d'observations redondantes et des poids accordés à chacune des images, Apero calcule la solution la plus probable pour l'ensemble des images. Les observations sont le plus souvent des points homologues, mais il est également possible d'intégrer des points au sol, des données GPS ou des résultats de calculs Apero précédents.

De même que Pastis, Apero est paramétré avec un fichier xml. Il dispose lui aussi d'une interface, Tapas, qui permet de réaliser la plupart de ses opérations avec une simple ligne de commande. Néanmoins, ce dernier offre moins de contrôle sur la stratégie de calcul ; il donne la possibilité de choisir parmi six modes de calcul prédefinis. Par exemple, le mode RadialBasic repose sur un modèle de distorsions radiales de 5 degrés de liberté : une focale, les coordonnées du point principal et du centre de distorsions, et enfin deux coefficients de distorsion.

Il est possible de donner en entrée de ces deux outils une calibration et/ou une orientation déjà connue des images qu'on souhaite traiter. Ainsi, lorsqu'on a réalisé un jeu d'images avec un appareil, il peut être intéressant de prendre une série de photographies avec ce même appareil qui servira uniquement à déterminer le modèle de calibration. En effet, des images texturées et complètement nettes garantissent une meilleure calibration. Or les images à traiter ne répondent pas forcément à ces critères : elles peuvent être lisses ou nettes sur certaines zones seulement, lorsque la profondeur de champ ne recouvre pas toute la zone photographiée.

Tapas n'offre pas d'autres fonctions. Apero permet, grâce à son fichier de paramètres de contrôler beaucoup plus finement tout le processus du calcul.

Apero fournit les résidus moyens de chaque image, ainsi que le nombre de points homologues utilisés. Il crée également un répertoire dans lequel se trouvent un ou plusieurs fichiers xml de calibration de l'appareil et un fichier d'orientation par image. Par défaut, Apero crée son propre repère local avec des unités arbitraires pour ses calculs. Il est possible de lui imposer certaines contraintes physiques afin d'avoir un repère plus cohérent. Il est possible d'agir sur trois critères :

- désigner une partie de la scène comme plan horizontal, afin que la composante Z, verticale à ce plan, ait un sens.
- utiliser une ligne de la scène de direction connue pour orienter le repère
- utiliser un objet de la scène dont on connaît la taille pour mettre le modèle à l'échelle

Ces fichiers xml peuvent ensuite être utilisés avec MicMac pour la mise en correspondance des images.

### **MICMAC (Mutli Images correspondances par Méthodes Automatiques de Corrélation)**

Le logiciel effectue le calcul automatique de mise en correspondance d'images. Ce corrélateur subpixellique détermine la disparité de chaque point pour des images dont on connaît l'orientation et la calibration. Son objectif premier était d'apporter une solution générale aux différentes applications de cartographiques de mise en correspondance. Il a ainsi été utilisé dans divers contextes :

- calcul de MNT à partir d'images satellites
- calcul de modèle numérique d'élévation (MNE) de zones urbaines avec des images haute résolution
- modélisation 3D d'objet et de scène intérieure ou extérieure
- détection de mouvement de terrain ...

Cette généralité d'utilisation entraîne cependant la complexification du paramétrage.

### **Stratégies de géométries**

Si MicMac utilise les points homologues fournis par Tapioca pour évaluer la profondeur de la scène, il recalcule par la suite tous les pixels homologues pour déterminer les parallaxes de chaque point.

MicMac propose trois principales stratégies de géométrie pour le calcul des pixels homologues : géométrie terrain, géométrie faisceau et géométrie épipolaire.

Lors du PFE, la géométrie adoptée pour le traitement d'images a été la géométrie faisceau. Non seulement elle peut être utilisée sur un ensemble de plusieurs images, mais en plus elle permet de différencier parallaxe stéréoscopique et parallaxe transverse (voir Tableau 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

	Px1	Px2	Nombre d'images	Couples traités
Géométrie terrain	oui	non	n	Image i – Image j
Géométrie faisceau	oui	possible	n	Image maître – Image i
Géométrie épipolaire	oui	possible	2	Image1 – Image 2

Tableau 3 : récapitulatif des différentes géométries

Dans le cas de la géométrie faisceau, on traite des couples composés d'une image maître et d'une image esclave. L'objectif est de trouver la position du point homologue de chaque point de l'image maître dans l'image esclave. La différence de coordonnées pixelliques entre les points homologues fournit la disparité de chaque point de l'image maître.

Chaque pixel de l'image maître représente un point M de l'espace. Pour chacun de ces pixels, MicMac va chercher la distance du point objet M par rapport au sommet S de l'image maître. Il fait « glisser » M le long du rayon perspectif (voir Figure 13). Pour chaque position de M, ses points images sont calculés pour toutes les images. Le maximum de corrélation est normalement atteint pour la position réelle de M. Une fois, M connu, MicMac retient ses coordonnées pixelliques dans chaque image. Il peut donc calculer la disparité de M. La disparité est calculée par rapport à l'image maître. Alors qu'en géométrie terrain on obtient les disparités pour les couples (image i)/(image j), la géométrie faisceau fournit les disparités des couples (image maître)/(image esclave).

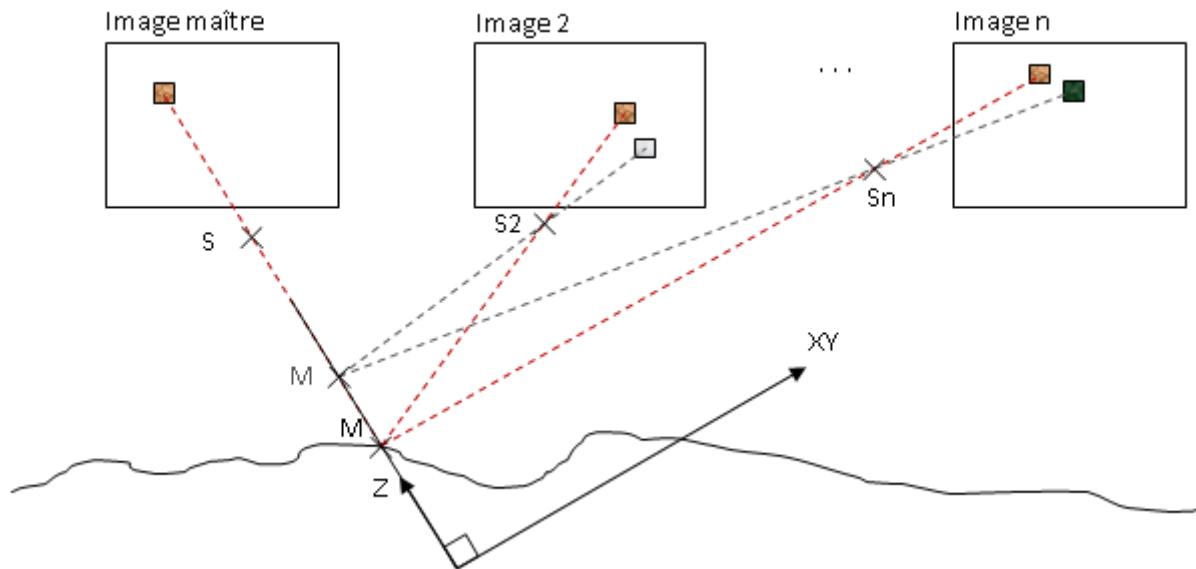


Figure 13 : Géométrie faisceau

Se déplacer dans l'espace le long du rayon perspectif correspond à se déplacer dans l'image selon la droite épipolaire. MicMac effectue donc une recherche du point homologue le long de la droite épipolaire et cherche également perpendiculairement cette droite. Après avoir trouvé la position avec le maximum de corrélation, il en déduit la parallaxe stéréoscopique et la parallaxe transverse. Le calcul de la parallaxe transverse est optionnel ; la géométrie faisceau est elle-même composée de différents types de stratégies qui incluent ou non la détermination de la parallaxe transverse. Ainsi, à l'inverse de

la géométrie terrain, la géométrie faisceau peut permettre de connaître le détail des composantes de la disparité (voir Figure 14). On obtient donc un résultat sur la disparité en 1D ou en 2D. MicMac note la parallaxe stéréoscopique  $px1$  et la parallaxe transverse  $px2$ .

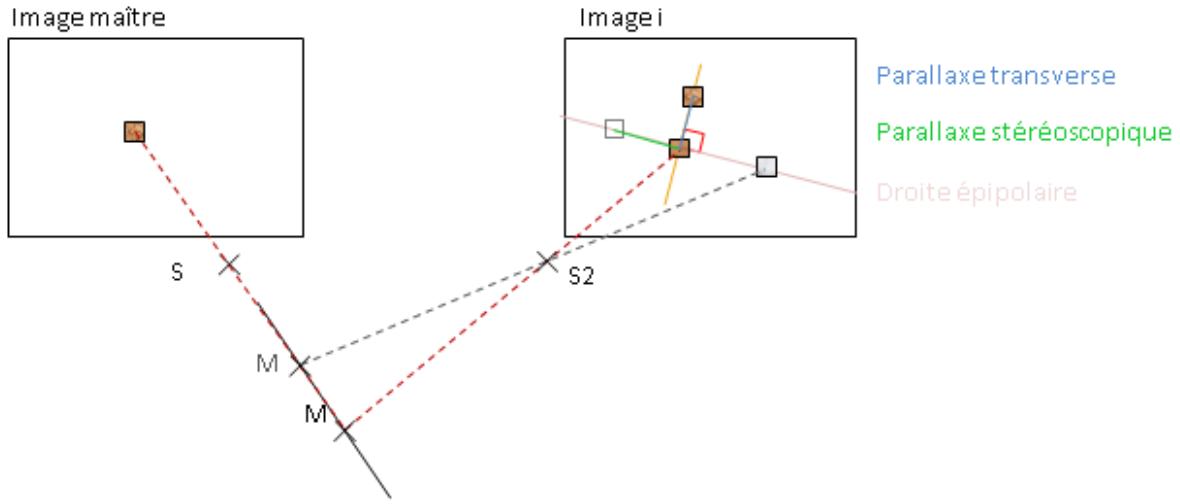


Figure 14 : Calcul de la disparité en deux dimensions

Cette recherche en 2D est rendue possible par l'approche multirésolution de MicMac.

### Approche multirésolution

MicMac a une approche multirésolution, c'est-à-dire que la recherche de pixel homologue est effectuée aux différentes résolutions spécifiées par l'utilisateur. L'idée est de commencer par une résolution grossière ; comme il y a moins de pixels sur les images, la recherche du maximum de corrélation est plus rapide. Ensuite, on affine la résolution et MicMac effectue sa recherche dans un intervalle fixé par l'utilisateur, autour du pixel ayant eu le meilleur coefficient de corrélation à la résolution précédente (voir Figure 15). Cette méthode permet d'accélérer le calcul, car on ne cherche plus dans toute l'image mais seulement dans la zone délimitée par les intervalles.

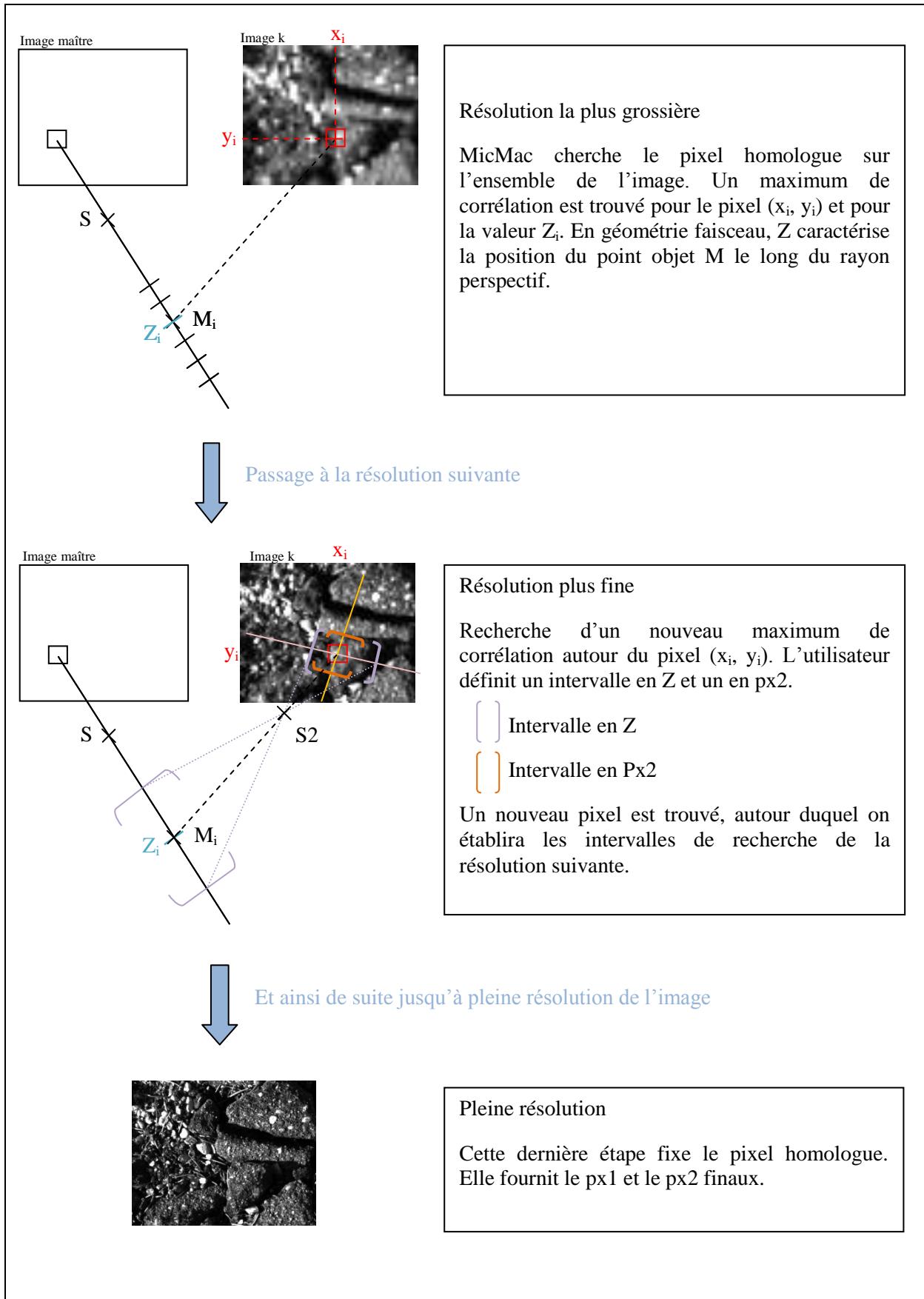
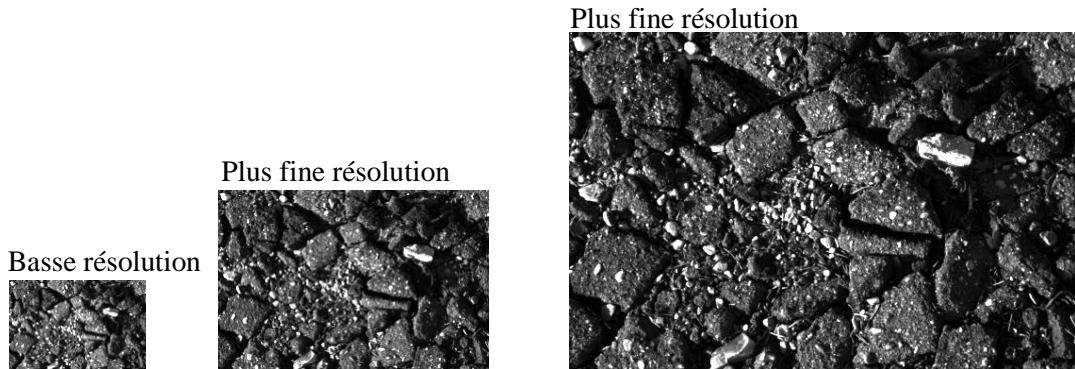


Figure 15 : Approche multirésolution de MicMac

Les intervalles de recherche sont très importants. En effet, s'ils sont bien définis, ils permettent de diminuer le temps de calcul. Cependant, s'ils sont trop réduits, le logiciel en cherche plus dans la bonne zone et le résultat est erroné. Il est donc nécessaire de bien comprendre comment fonctionne MicMac.

## Résultats

MicMac sauvegarde les images créées puis utilisées pour l'approche multirésolution.



**Figure 16 : Pyramide d'images des gravas à différentes résolutions**

Mais surtout, le logiciel fournit les résultats sur la disparité. Il regroupe des fichiers images pour les différentes parallaxes, des fichiers images des coefficients de corrélation et des fichiers xml comprenant des informations sur les disparités et sur le repère utilisé.

Concernant les parallaxes, MicMac fournit pour chaque pixel de l'image maître, la valeur de chacune des parallaxes. La parallaxe stéréoscopique est un MNT de la scène photographiée ; la parallaxe transverse montre les projections des déplacements.

Les Figures 17 et 25 présentent un couple de photographie de gravas. Entre les deux prises de vue, un caillou a été déplacé de quelques millimètres (voir Figure 18). On devrait donc observer ce mouvement sur l'image des px2. La première image a été utilisée comme image maître. Les résultats de parallaxe sont donc fournis dans sa géométrie, c'est-à-dire que les images résultats sont superposables à l'image maître. Le traitement de ces deux images a permis d'obtenir le relief de la zone (voir Figure 19) et la parallaxe transverse (voir Figure 20). La disparité ne peut être calculée que pour les points présents sur les deux photographies. Les parallaxes ne sont donc déterminées que sur la zone d'intersection entre les deux images. C'est pour cette raison que sur les Figures 19 et 20 les parallaxes n'apparaissent pas partout et qu'il existe des zones uniformes : on retrouve sur ces figures l'emprise de la seconde image sur l'image maître.



**Figure 17 : Image maître de l'expérimentation. En rouge, l'emprise de la seconde image**



**Caillou ayant été déplacé**

**Figure 18 : Seconde image du couple**

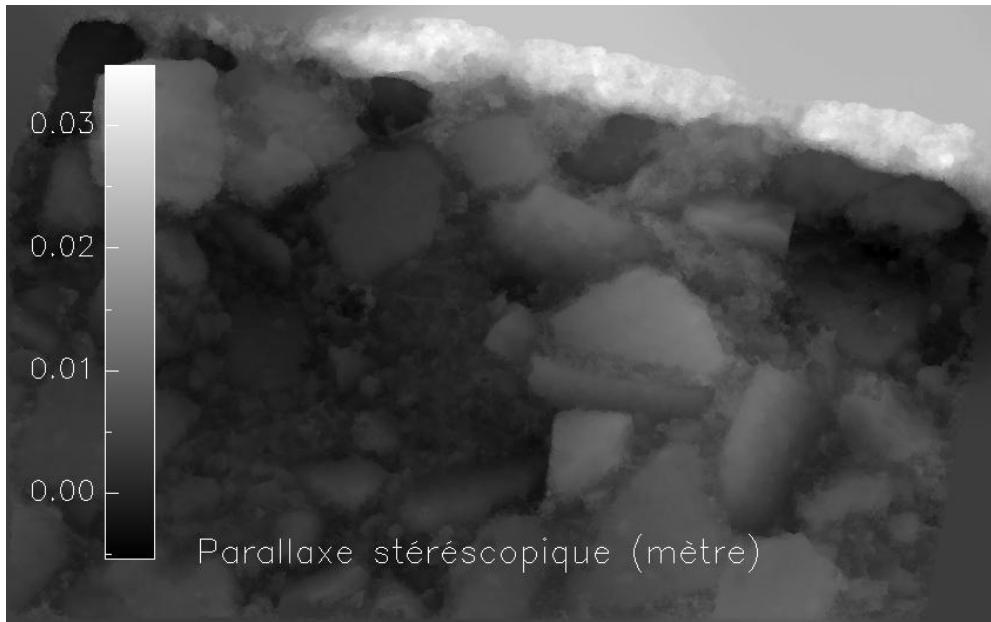


Figure 19 : Parallaxe stéréoscopique du couple d'images. Le résultat se trouve dans la géométrie de l'image maître.

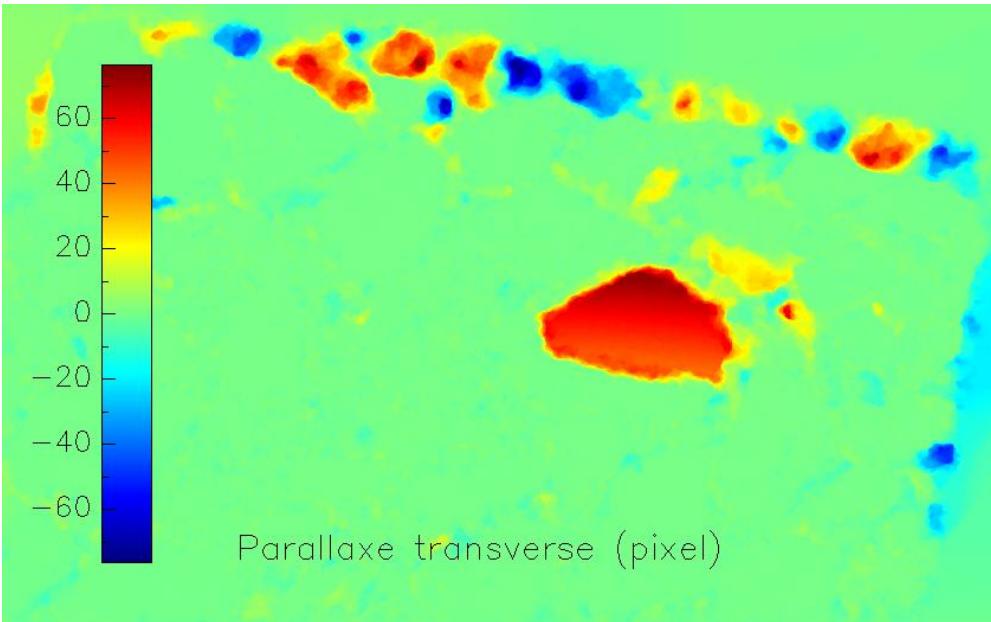


Figure 20 : Parallaxe transverse du couple d'images. Le résultat se trouve dans la géométrie de l'image maître.

On observe effectivement que les pixels représentant le caillou mobile ont une forte parallaxe transverse. Ils sont caractérisés par des valeurs comprises entre 40 et 70 pixels alors que les points restés immobiles ont des valeurs proches de 0. Cette expérience avait seulement pour objectif de m'apprendre à utiliser l'ensemble des logiciels de MicMac, aussi elle n'a pas été assez rigoureusement effectuée pour pouvoir déterminer la taille d'un pixel au sol en mètre. On ne peut donc dire si les valeurs observées représentent le déplacement avec justesse. On peut toutefois constater que px2 et déformations sont liés. On remarque que d'autres points ont de fortes valeurs : ceux situés au niveau de l'emprise de la seconde image. Ces valeurs semblent donc plutôt liées à un effet de bord qu'à un déplacement. On constate également que les pixels hors zone d'intersection entre les deux images ont une valeur nulle : il n'est pas possible de calculer une parallaxe transverse si le pixel n'est pas présent sur deux images d'un couple.

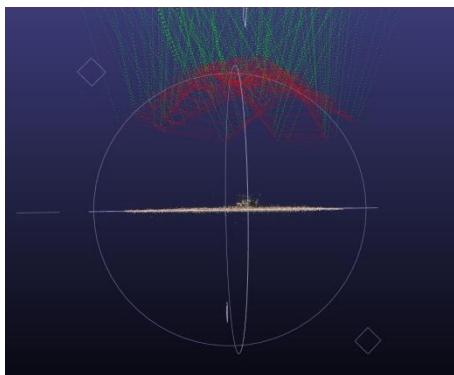
MicMac produit aussi une image qui contient les valeurs des coefficients de corrélation normalisés pour chaque paire de pixels homologues. On obtient également ce résultat sur le couple étudié précédemment (voir Figure 21).



**Figure 21 : Coefficient de corrélation du couple d'images. Résultat final : DeZomm 1, Num 12.**

On constate que les plus fortes valeurs se situent à la surface des gravas. Les zones entre les cailloux ont de moins bons scores. Cela est dû au fait qu'elles sont plus susceptible d'être des zones d'occlusion. En effet, Elles sont située plus en profondeur ; elles peuvent donc être visibles depuis une prise de vue, mais cachées depuis une autre.

Il est possible de visualiser le nuage de points 3D sur un logiciel tel que MeshLab (voir Figure 22). Cela peut permettre de vérifier que la mise à l'échelle ou le basculement selon un certain plan ont été correctement effectués.



**Figure 22 : Nuages de points 3D photographiés**

### 2-2-2 Programmes IDL

Les algorithmes correspondant à la méthode ont été écrits en langage IDL (Interactive Data Language). Ce langage de programmation propriétaire est proche de Matlab. Il est particulièrement utilisé en traitement d'images, notamment dans les domaines de la télédétection et astronomie. IDL est un langage vectoriel adapté au traitement de données et à la visualisation.

Les programmes ont été écrits de façon à pouvoir être intégrés dans la chaîne de calcul de corrélation d'image du CEA. Ils emploient donc directement les résultats issus du corrélateur MicMac. Ils ont également été pensés afin de pouvoir être appliqués aussi bien à des images satellites qu'à des photographies aériennes ou terrestres. En effet, les fichiers d'orientation et certains calculent varie d'un type d'images à l'autre.

Parmi les programmes réalisés, on peut évoquer les principaux. L'un permet de calculer les vecteurs directeurs des directions de projection Vpx2. Un second réalise l'inversion 3D des déplacements d'un ensemble de pixel à partir des parallaxes transverses de chaque point et des vecteurs Vpx2. Un programme similaire a été créé pour être adapté à l'inversion planimétrique des déplacements. Un important programme de simulation a également été mis en place.

L'écriture de ces programmes m'a non seulement permis d'apprendre le langage IDL, mais aussi de mieux maîtriser la vectorisation qui fait partie de ses caractéristiques. Cela m'a également permis de me familiariser avec le logiciel ENVI. En effet, ce dernier est utilisé conjointement avec IDL afin de visualiser les images et les résultats de calcul.

## Chapitre 3 : Expérimentation

Plusieurs expériences ont été menées à bien afin de tester la méthode mise en place et les algorithmes développés. Le but recherché était non seulement de vérifier que la technique étudiée fonctionne, mais également d'étudier les contraintes posées par cette méthode.

Le schéma général des expériences terrain consistait à réaliser une série de photographie d'un objet immobile, puis de le déplacer ou le déformer d'une quantité connue. Le but était de comparer les déplacements calculés aux déplacements vrais. Trois expériences ont ainsi été effectuées en parallèle.

### 3-1 Protocole expérimental

La première expérience a été réalisée avec une platine de positionnement (voir Figure 24). Cette dernière est équipée d'un axe qui permet d'effectuer une translation. Le déplacement linéaire peut être déterminé avec une précision de 10 microns, grâce au vernier de la platine. Nous avons ainsi pu photographier des séquences d'images avant/après un mouvement connu à  $10\mu\text{m}$  près.

Les deux autres tests ont été réalisés avec une carte en relief (voir Figure 23). Dans un cas, il s'agissait de poser un poids sur la carte afin de créer une déformation pour chaque point de la carte. Dans le second cas, une bande a été découpée dans la carte et translatée afin de simuler un glissement le long d'une faille. Pour connaître la valeur des déplacements, un second appareil photo était installé sur trépied, au nadir. Les images issues de cet appareil avaient exactement la même prise de vue, aussi l'absence de parallaxe stéréoscopique permettait de mesurer directement les déplacements. Bien que dans l'expérience avec la platine le vernier fournit une valeur du déplacement, un second appareil a également été installé de manière à avoir une deuxième valeur.

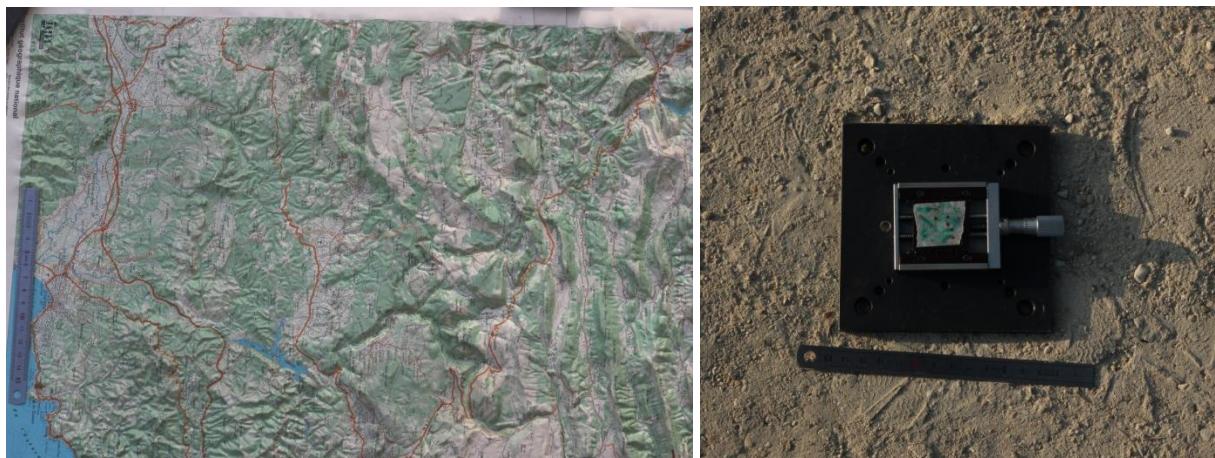


Figure 23 : Carte en relief utilisée

Figure 24 : Platine de micro contrôle. L'objet dont nous souhaitons calculer le déplacement est le papier scotché au centre de la platine. Il a été texturé afin de rendre la recherche des points homologue plus facile.

Si l'idée générale sur le déroulement des expériences semblait évidente, il a fallut étudier différents paramètres et prendre en compte certaines contraintes afin d'élaborer un protocole solide. Marc Pierrot Deseilligny, nous a conseillé sur la mise en place des différentes expériences. Son aide était d'autant plus intéressante qu'il est l'auteur du logiciel MicMac.

### 3-1-1 Distance de travail

Comme nous souhaitions prendre des photos depuis des prises de vue variées, il fallait que la distance de travail nous permette de tourner autour de l'objet, qu'il s'agisse de la platine ou de la carte. Il a donc fallut d'abord calculer la distance minimum appareil-objet en fonction de la focale. Soit  $m$  la taille du pixel et  $M$  la taille qu'il représente sur le terrain (voir Figure 25). On note  $f$  la distance focale et  $D$  la distance entre le centre optique et l'objet.

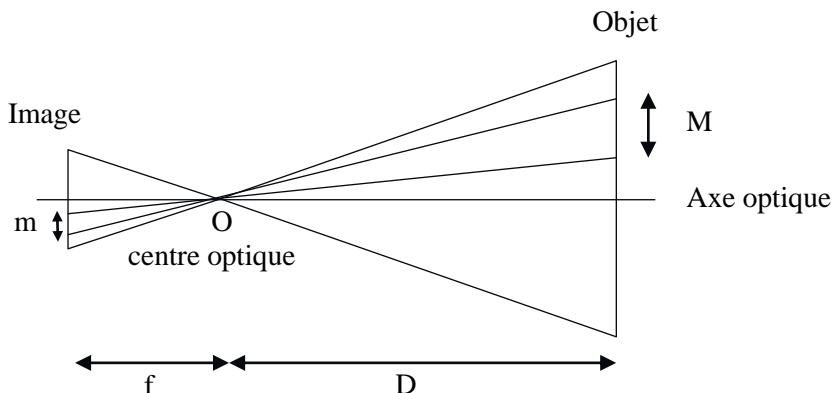


Figure 25 : Schéma optique de l'appareil

On sait que la précision maximale que l'on pouvait atteindre avec la corrélation était de 0,1 pixel. Or, la platine nous permet de mesurer 10 microns. Il faut donc que la longueur au sol correspondant à 0,1 pixel soit supérieure à  $10\mu\text{m}$  afin que la précision sur la mesure de contrôle soit supérieure à la mesure obtenue avec la méthode testée.

$$\text{Ainsi : } 0.1 \times M > 10\mu\text{m} \quad [12]$$

$$\text{Or, on a : } M = m \times \frac{D}{f} \quad [13]$$

$$\text{D'où : } 0.1 \times m \times \frac{D}{f} > 10\mu\text{m} \quad [14]$$

$$\text{Soit : } D > \frac{f}{m} \times 10^{-4} \text{ mètre} \quad [15]$$

On dispose d'un appareil Canon EOS 550D, doté d'un capteur de taille  $22.3 \times 14.9$  mm, soit  $5184 \times 3456$  pixels. La taille  $m$  d'un pixel est donc de  $4.3 \times 4.3 \mu\text{m}$ . Le Tableau 4 présente la distance minimale  $D$  à respecter selon différentes valeurs de  $f$ .

$f$ (mm)	$D$ minimale (m)
50	1.16
35	0.81

Tableau 4 : Distance minimale appareil-objet à respecter

Le Canon est équipé d'un objectif avec une focale fixe de 50 mm, ce qui semble suffire, puisqu'il suffit de se trouver à plus 1.16m de l'objet pour que le déplacement mesuré avec les images soit contrôlable avec la mesure directe obtenue avec la platine micro-contrôlée.

### 3-1-2 Ouverture du diaphragme et profondeur de champ

Pour que l'expérience réussisse, il faut que toute l'aire photographiée soit net afin que l'on puisse corrélérer les images avec la meilleure précision possible. La profondeur de champ constitue la zone de

l'espace dont la représentation image sera considérée comme nette par l'œil humain. L'étendue de cette zone dépend des paramètres de prise de vue, dont notamment la distance appareil-objet et l'ouverture du diaphragme, que l'on note N. Plus on ferme le diaphragme, plus la profondeur de champ est importante. Dans notre cas, il semble donc qu'il faille opter pour une ouverture faible.

Cependant, lorsque l'ouverture du diaphragme est trop étroite, la lumière passant par l'ouverture est diffractée. Plus l'ouverture est faible, plus le phénomène est important. La diffraction produit une tâche qui floute l'image. Si le diamètre de la tâche est supérieur à la taille du pixel, l'image perd en netteté et sa résolution n'est alors plus égale à la taille du pixel mais à celle de la tâche. Il s'agit donc de trouver un compromis afin d'avoir la plus grande ouverture de champ possible sans effet de diffraction. Pour un appareil reflexe APS-C comme celui dont nous disposons, l'ouverture minimale que l'on peut utiliser sans perte est f/11 (Source : <http://www.aubade-photos.com/blog6/?p=1221>).

Une fois que l'ouverture du diaphragme est déterminée, il faut vérifier que la profondeur de champ dont on dispose est suffisante. Il est possible de la calculer grâce aux formules d'optique suivantes :

$$PdCh = \frac{2 \times H \times D^2}{H^2 - D^2} \quad [16]$$

Avec D : la distance appareil-objet, appelée distance de mise au point

H : la distance hyperfocale

On obtient H avec :

$$H = \frac{f^2}{N \times c} \quad [17]$$

Avec f : la focale

N : l'ouverture du diaphragme

c : le cercle de confusion

Tous les éléments de ces équations ont déjà été déterminés (D, f, N) sauf le cercle de confusion.

*Au niveau du film ou du capteur photographique, le CdC correspond au diamètre des points, qui une fois le facteur d'agrandissement appliqué à l'image source, correspondront à la taille des détails les plus fins discernable par l'observateur sur l'image finale.*

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle\\_de\\_confusion#Pour\\_la\\_photographie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_de_confusion#Pour_la_photographie)

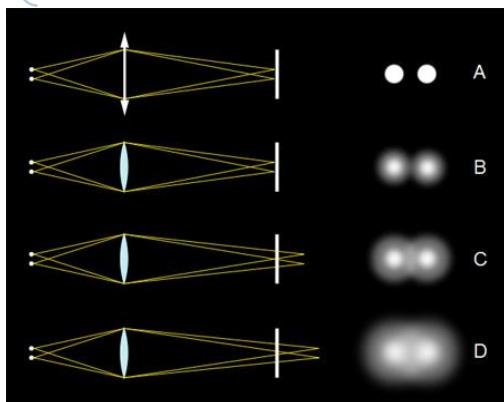


Figure 26 : Variation de la représentation de 2 points

A : cercle de confusion

B : les 2 point sont des taches discernables le CdC admissible n'est pas atteint

C : le CdC admissible est légèrement dépassé

D : le CdC admissible est largement dépassé

Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle\\_de\\_confusion#Pour\\_la\\_photographie](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_de_confusion#Pour_la_photographie)

La valeur du cercle de confusion varie selon les constructeurs de capteurs et la taille du capteur. La valeur généralement admise pour le Canon 550D est de 0.019 mm (Source : <http://phototrend.fr/2010/05/mp-78-cercle-de-confusion-une-notion-qui-reste-floue/> et [http://www.dofmaster.com/digital\\_coc.html](http://www.dofmaster.com/digital_coc.html))

Ainsi pour  $f = 50 \text{ mm}$ ,  $N = 11$ ,  $D = 1.30 \text{ m}$  et  $c = 0.019 \text{ mm}$ , on obtient une profondeur de champ de 28 cm. Un calculateur de profondeur de champ découvert sur internet calcule la même valeur pour notre appareil. (Source : <http://www.dofmaster.com/dofjs.html>)

### 3-13 Angles d'incidence

L'expérience doit simuler des prises de vue des satellites très haute résolution, il faut donc prévoir de réaliser des photos avec des angles d'incidences variés et élevés. Les paramètres de prises de vue sont tous déterminés mais il reste juste à vérifier que la profondeur de champ est suffisamment importante pour les prises de vue à angle d'incidence élevé.

Le capteur étant de taille  $22.3 \times 14.9 \text{ mm}$ , pour une distance de travail de 1.30 m, la scène photographiée est de  $58 \times 39 \text{ cm}$ .

Lorsque l'image est prise proche du nadir, avec un angle d'incidence faible, la scène photographiée se situe dans la profondeur de champ. L'image entière sera donc nette (voir Figure 27).

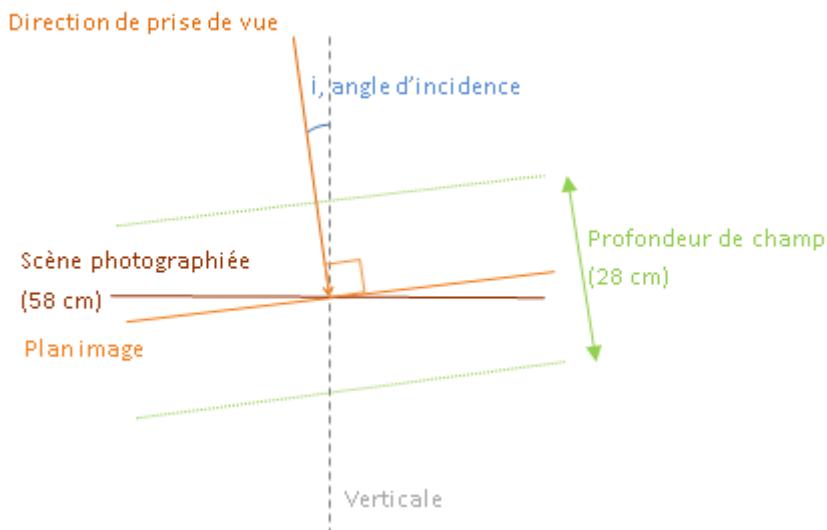


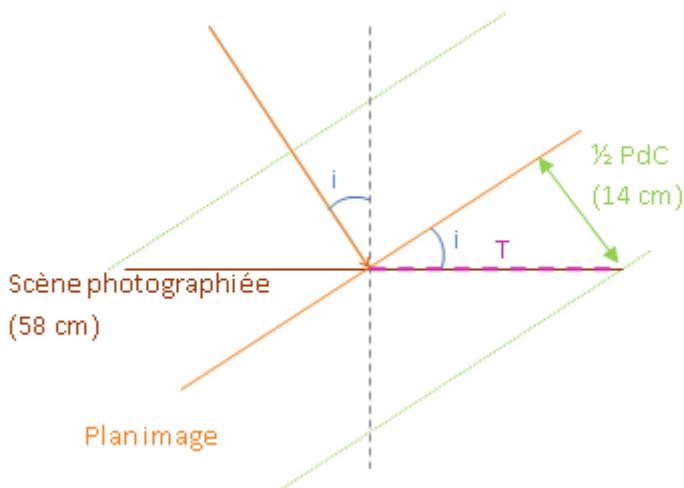
Figure 27 : Scène photographiée avec un faible angle d'incidence

Avec un angle d'incidence élevé, pour que la totalité de l'image soit nette il faut que la scène photographiée reste dans la profondeur de champ (voir Figure 28). Il faut donc que  $T \geq 29 \text{ cm}$ .

$$\text{Or on a } \sin i = \frac{\frac{1}{2}PdC}{T} \quad [18]$$

$$\text{Donc } i \leq \arcsin\left(\frac{\frac{1}{2}PdC}{T}\right) \quad [19]$$

Ainsi, on peut réaliser des images avec un angle d'incidence maximal de  $\arcsin\left(\frac{\frac{1}{2} \times 28}{29}\right) = 30^\circ$ .



**Figure 28 : Scène photographiée avec un fort angle d'incidence**

Un angle d'incidence de  $30^\circ$  permet de modéliser des prises de vue satellitaires. En effet, les satellites tels que Pléiades peuvent acquérir des images avec des angles d'incidences de  $+/-30^\circ$ .

Les paramètres de prises de vue permettent donc bien de simuler une acquisition satellitaire.

### 3-2 Réalisation de l'expérience

Nous avons réalisé l'expérience avec deux ingénieurs de l'IPGP qui travaillent en collaboration avec M.Binet. Silvio Del Pizzo, doctorant qui travaille avec Marc Pierrot Deseilligny est également venu prendre part aux mesures.

Nous disposions d'un Canon EOS 550D et d'un Canon EOS 400D. Le premier a servi d'appareil mobile : nous avons acquis de nombreuses images avant et après déplacement, avec différents angles d'incidence et d'azimuts. Le second restait fixé à un trépied pendant toute la durée des expériences. Ses images servaient donc de vérité terrain, puisque, ayant la même position et orientation, elles permettaient de mesurer directement les déformations. Les objets à photographier étaient une carte en relief de l'IGN et une platine de micro contrôle. Pour chaque expérience, nous avons posé une règle non loin de l'objet afin de pouvoir mettre les images à l'échelle par la suite.

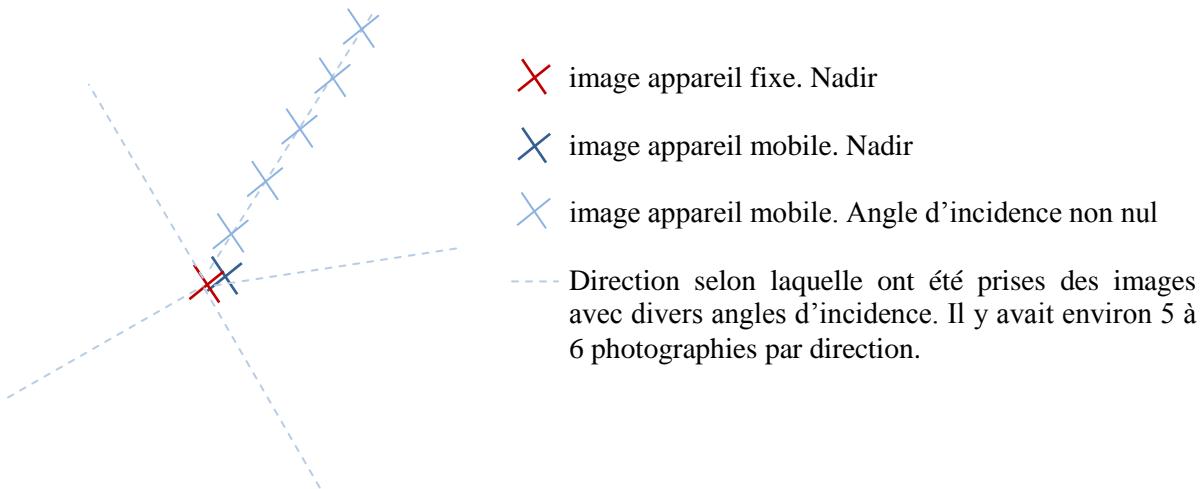


**Figure 29 : Dispositif des expériences**

Nous avons réalisé les images en extérieur, pour bénéficier d'assez de lumière. Chacune des expériences s'est déroulée de la même manière :

- Installation de l'objet photographié au sol
- Fixation du trépied avec l'appareil fixe au nadir de l'objet
- Acquisition d'une image avec l'appareil fixe
- Acquisition d'images avec l'appareil mobile, selon plusieurs directions et avec différents angles d'incidence (voir Figure 30)
- Acquisition d'une image avec l'appareil fixe

- Déplacement de l'objet (translation ou déformation). Un poids a été déposé sur la carte pour la 1<sup>ère</sup> expérience. Une bande découpée dans la carte a été déplacée de quelques millimètres pour l'expérience 2. Une translation de 500 µm au niveau de la platine a été effectuée.
- Acquisition d'une image avec l'appareil fixe
- Acquisition d'images avec l'appareil mobile, selon plusieurs directions et avec différents angles d'incidence
- Acquisition d'une image avec l'appareil fixe



**Figure 30 : Configuration des prises de vue, vue nadir.** Cette configuration a été adoptée pour chaque séquence avant et chaque séquence après déplacement.

Les images réalisées ont été enregistrées au format brut cr2 et en jpg. Ce sont les formats cr2 qui ont été utilisés car les jpg perdent en information. La taille des images est de 5202 x 3465 pixels. Il est important de connaître la taille d'un pixel au sol. Cette dernière peut être calculée avec l'équation suivante :

$$\frac{\Delta m}{H} = \frac{\Delta p}{f} \quad [20]$$

Avec  $\Delta m$  : la taille d'un pixel au sol en mètre

$\Delta p$  : un pixel

H : la distance sommet-objet, en mètre

F : la focale de l'appareil, en pixel

Toutes les images réalisées non pas été utilisées. Pour les images dont nous nous sommes servis, le H moyen était de 1.29m. La distance focale est donnée dans le fichier de calibration d'Apero ; elle est de 12 429.31 pixels.  $\Delta p$  vaut un pixel. On en déduit que la taille d'un pixel au sol est de 103.79 µm.

Nous avons ainsi acquis 54 images pour l'expérience avec déformation molle de la carte, 55 pour celle où l'on faisait glisser une bande et 59 pour l'expérience avec la platine.

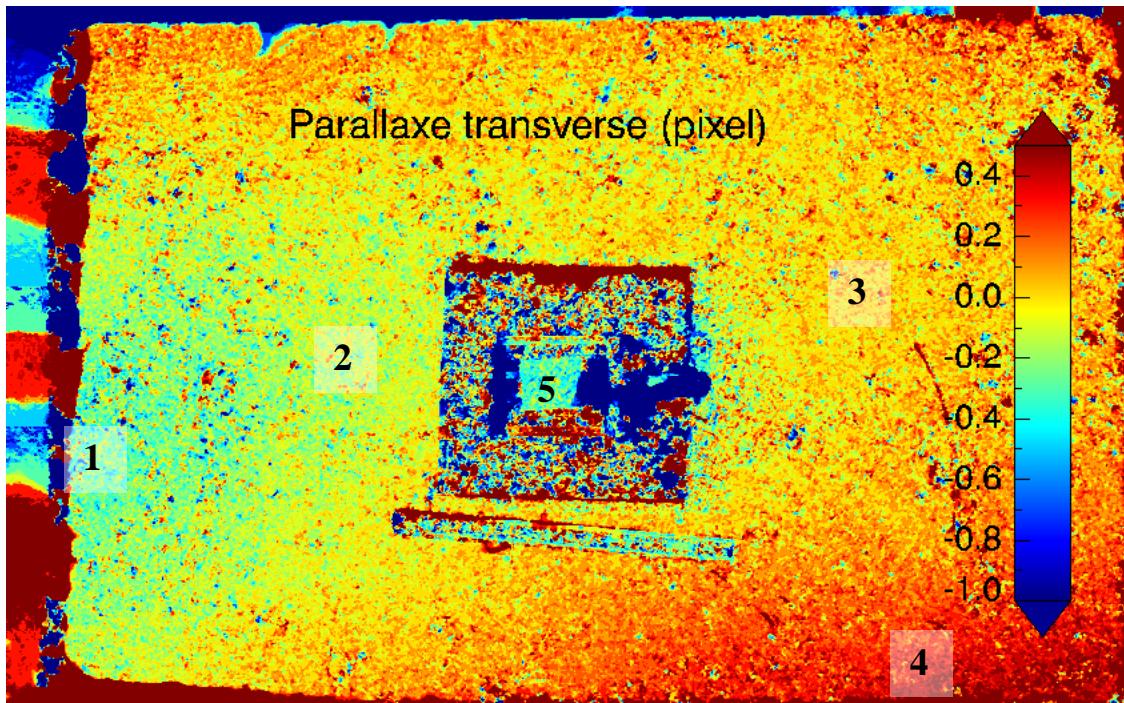
### 3-3 Traitement des images

#### 3-3-1 Qualité des images acquises

Les images de l'expérience avec la platine ont été traitées en premier. Après avoir calculé de nombreux points homologues avec Tapioca, nous avons voulu réaliser l'aérotriangulation en bloc de toutes ces images avec Apero. A ce moment est apparue une faiblesse des images. Malgré une étude approfondie du protocole, les résidus d'orientation et de calibration des images étaient de 0.3 pixel.

Nous n'avons pas réussi à abaisser les résidus en dessous de cette valeur, or ces résidus risquent par la suite d'induire un biais sur la corrélation.

Afin d'évaluer les biais introduit par les erreurs d'orientation et de calibration, nous avons utilisé un couple d'images, toutes deux réalisées avant le déplacement (voir Figure 31**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) En théorie, dans ces conditions, la parallaxe transverse devrait être nulle. En pratique, elle sera toujours un peu bruitée. Nous nous sommes intéressés aux biais de corrélations observés sur la parallaxe transverse.



**Figure 31 : Parallaxe transverse d'un couple de deux images réalisée avant déplacement de la platine. (pixel)**

On remarque tout d'abord que les pixels du métal de la platine corrèlent mal. Ceci est normal car ils constituent une zone homogène, sans texture, Micmac a donc du mal à corrélérer. Ce qui nous intéresse surtout dans ce cas, ce sont les différentes zones que l'on distingue sur l'image. On observe des zones concentriques, dont le centre est situé à gauche de l'image. Chacune de ces zones présente un biais différent. Nous avons calculé des statistiques sur ces zones, afin d'y déterminer la valeur moyenne de la parallaxe transverse. Nous avons ainsi étudié quatre zones, numérotées de gauche à droite (voir Figure 31). Nous avons également défini une cinquième zone au niveau du papier scotché sur la platine car c'est son déplacement qui nous intéresse.

Zone	1	2	3	4	5
Biais (pixel)	-0.22	-0.11	0.02	0.3	-0.3

**Tableau 5 : Biais caractéristiques des zones définies au sein de l'image**

Les biais observés ne sont pas négligeables lorsqu'on les compare à la valeur de la précision espérée. Ils sont compris entre -0.3 et 0.3 pixel alors que la précision de corrélation attendue était de 0.1. Les images acquises ont donc une qualité limitée pour la réalisation du test.

Le protocole ayant été établi avec rigueur, la question se pose de savoir d'où proviennent les résidus d'orientation et de calibration. Plusieurs hypothèses ont été émises :

- Mauvaise détermination des points sift par Tapioca
- Nombre insuffisant de points homologues utilisés par Apero

- Problème de convergence dans les algorithmes d'Apero
- Mouvement du système optique entre les prises de vue

Des expériences précédentes réalisées au CEA ont montré que l'erreur sur la détermination des points homologues par Tapioca était de 0.1 pixel. Aucun biais n'était constaté. Au vu du grand nombre de points homologues calculés (plusieurs centaines de milliers par couple), ces erreurs doivent normalement se compenser lors du calcul de calibration et d'orientation.

Pour chaque couple d'images, Tapioca avait déterminé plusieurs centaines de milliers de points homologues. Nous avons vérifié que lors des calculs de calibration et orientation Apero utilisait bien plus de 99% de ces points. Le problème ne semble donc pas non plus venir d'un nombre insuffisant de points.

Il est tout à fait possible que l'appareil utilisé ne soit pas assez stable et que son mécanisme bouge légèrement entre les prises de vue. Cela engendrerait alors des erreurs de calibration et orientation. Nous ne disposons malheureusement pas d'un meilleur appareil pour refaire les photographies.

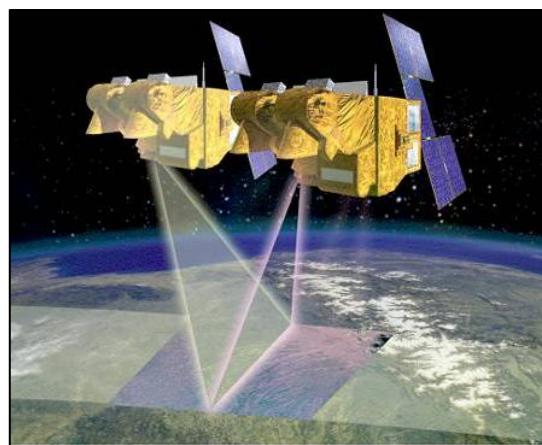
La zone centrale où se trouve le papier est caractérisée par un des biais les plus forts : -0.3 pixel. Aux résidus d'Apero peut s'ajouter une deuxième cause : il semble que MicMac ait du mal à corrélérer les espaces plats. Or le papier étant scotché sur la platine, il constitue un objet plan.

Les autres séries d'images n'ont pas donné de meilleurs résultats. Nous avons calculé qu'un biais de 0,3 pixel représente 5% du déplacement, les images ne sont donc pas complètement inexploitables. Nous avons donc choisi de traiter les images de la platine, dont nous nous sommes ensuite inspirés pour la simulation.

### 3-3-2 Choix des images

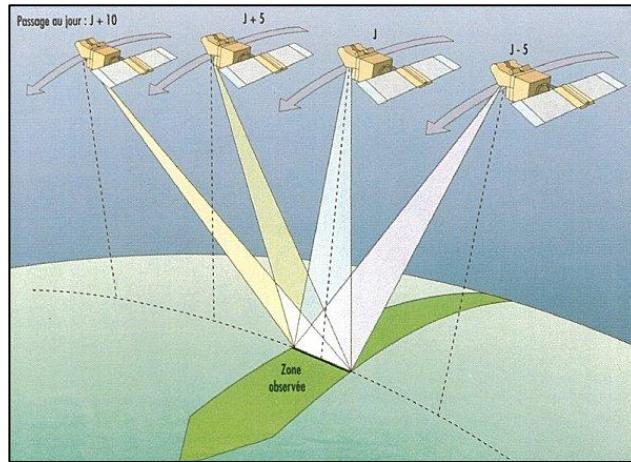
Si toutes les images ont été traitées avec Tapioca et Apero, la corrélation n'a été appliquée qu'à une sélection réduite. En effet, cette étape est assez longue et ne pouvait être réalisée pour toutes les photographies. De plus, l'idée n'était pas de tester les algorithmes avec un maximum de données à la fois, mais plutôt d'évaluer les résultats atteints avec un nombre d'images restreint. Cela correspond mieux à la quantité d'images satellites dont on peut disposer. Pour l'inversion 3D, il faut au minimum deux images avant et deux images après déplacement, c'est donc le nombre d'images que nous avons décidé d'analyser.

Les images à traiter ont été choisies afin de représenter des configurations réalistes d'images satellites. En effet, lorsqu'un satellite acquiert plusieurs images à la suite, les prises de vue de ses images sont situées le long de sa trajectoire. Elles sont donc alignées, comme on peut le voir sur la Figure 32.



**Figure 32 : Acquisition d'un couple d'images.**  
Source : <http://spot5.cnes.fr/satellite/44.htm>

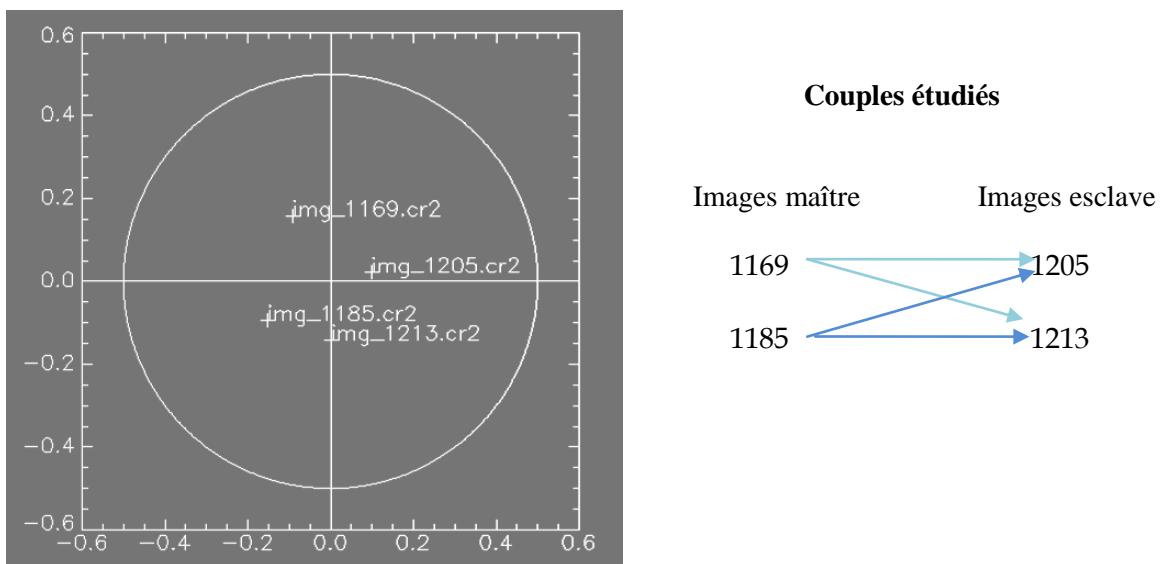
De plus, lors de la revisite, le satellite a une trajectoire parallèle à celle de la première acquisition mais légèrement décalée (voir Figure 33). Les images « après » sont donc alignées parallèlement aux images « avant ».



**Figure 33 : Prises de vue des revisites d'un satellite.**

Source : <http://regard-sur-la-terre.over-blog.com/article-le-relief-par-satellite-c-est-louche-manhattan-en-3d-avec-pleiades-99537701.html>

Ainsi, la désignation des images avant et après a été réalisée de manière à respecter les trajectoires des satellites : les images 1169 et 1185 ont été utilisées comme des images avant déformations, et les images 1205 et 1213 comme des images acquises après le déplacement (voir Figure 34).



**Figure 34 : Configuration des images analysées**

Cette configuration permet de former quatre couples avant/après. Nous obtenons ainsi quatre résultats de corrélation, soit quatre projections différentes du déplacement, ce qui est suffisant pour calculer une inversion 3D.

Nous avons également traité les images acquises avec l'appareil fixe. Nous avons corrélé une image avant et une image après afin d'avoir une vérité terrain supplémentaire.

## 3-4 Analyse des résultats

### 3-4-1 Analyse des images issues de l'appareil fixe

Les deux images traitées ont la même prise de vue ; elles sont donc superposables et présentent les mêmes effets de relief. Dès lors, leur parallaxe stéréoscopique ne représente plus l'altitude des points mais leurs déplacements le long de la droite épipolaire. La parallaxe transverse caractérise elle le mouvement selon la direction perpendiculaire à l'épipolaire. Le déplacement de chaque point est en théorie obtenu par la formule suivante :

$$d^2 = px1^2 + (px2)^2 \quad [21]$$

Cependant, le système optique a pu très légèrement bouger entre les deux prises de vue. Le sol constitue une référence car on sait qu'il est resté immobile d'une image à l'autre. Ses deux parallaxes devraient être nulles. Or ce n'est pas le cas : la parallaxe stéréoscopique moyenne au sol est de -0.40 pixel et la parallaxe transverse moyenne est de 1.46 pixel. Il faut soustraire ces biais aux résultats obtenus au niveau du papier afin de calculer le déplacement réel de ses points. L'équation [10] devient alors :

$$d^2 = px1_{papier} - px1_{sol}^2 + (px2_{papier} - px2_{sol})^2 \quad [22]$$

On obtient ainsi un déplacement moyen de 3.23 pixel pour le papier. Il s'agit maintenant de convertir cette valeur en unité métrique.

Grâce à la règle présente sur l'image, on peut déterminer la taille que représente un pixel au sol. Les 15 cm de règle comptent 945 pixels, la résolution au sol est donc de  $150000/945 = 158 \mu\text{m}$ . Toutefois, le papier n'est pas situé à la même altitude que le sol, la résolution est donc susceptible de varier entre les deux niveaux. La résolution à l'altitude du papier peut être déduite par un produit en croix : la différence d'altitude entre le sol et le papier est de 2.3 cm et le centre optique de l'appareil est situé à 1.30 m du sol. On obtient ainsi une résolution de  $(1.30 - 0.023) \times \frac{158 \cdot 10^{-6}}{1.30} = 155 \mu\text{m}$ . Le déplacement moyen du papier est donc de 501  $\mu\text{m}$ . On sait que la précision du corrélateur MicMac est de 0.1 pixel, le déplacement moyen est donc de  $501 \pm 16 \mu\text{m}$ .

On retrouve les 500  $\mu\text{m}$  mesurés avec la platine. Comme on ne connaît pas exactement la précision de cette dernière, la mesure photogrammétrique apparaît plus sûre c'est donc à elle que nous comparerons nos résultats.

### 3-4-2 Corrélation

La corrélation a été réalisée entre les quatre couples. Comme nous utilisons deux images maître, nous obtenons quatre images de parallaxe transverse, dans deux géométries différentes : les résultats des couples 1169/1205 et 1169/1213 sont superposables à l'image 1169 et ceux des couples 1185/1205 et 1185/1213 sont superposables à l'image 1185 (voir Figure 35).

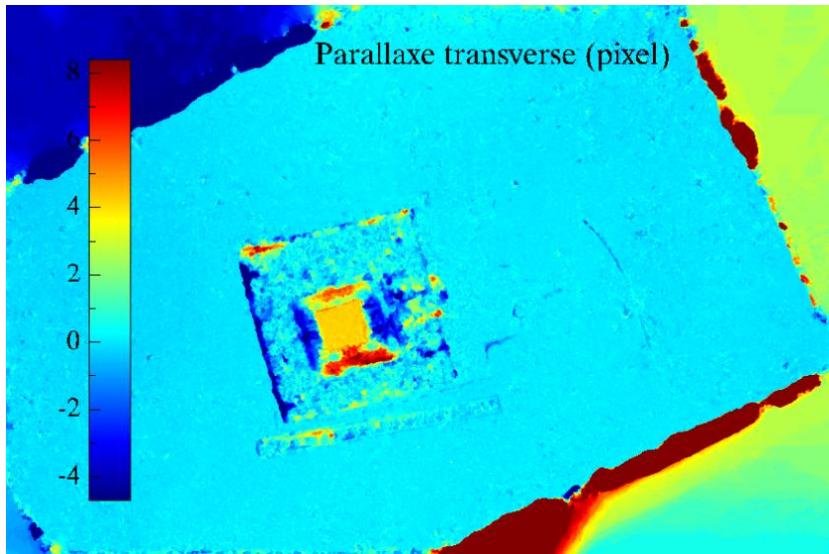


Figure 35 : Résultat de la corrélation du couple 1885/1205 : parallaxe transverse, en pixel.

Image maître : 1885



Image esclave : 1205



En examinant la parallaxe transverse obtenue pour le couple 1185/1205, on remarque tout d'abord un grand espace rectangulaire bleu. C'est la zone de recouvrement entre les deux images. Les pixels de l'image 1885 situés à l'extérieur de cette zone n'ont pas de pixel homologue dans la seconde photographie. MicMac ne peut donc calculer de parallaxe ; on obtient alors des valeurs dénuées de logique.

On remarque que l'aire sableuse est caractérisée par une parallaxe transverse faible, comprise entre 0 et 1 pixel, et homogène. Cela s'explique par le fait que le sol n'a subit aucune déformation. Sa parallaxe transverse ne caractérise dès lors que les défauts de modélisation et les erreurs de corrélation.

On reconnaît la forme du socle : les résultats de corrélation y sont plus bruités que sur le sol. Cela est dû à son aspect. La base étant sombre et homogène, il n'y a pas de texture à cet endroit de l'image et MicMac a des difficultés à distinguer chaque point. La corrélation est donc moins réussie.

Deux zones plus foncées se détachent au sein de la platine. Elles correspondent à deux cavités, comme on peut le voir sur la [Figure 36](#). Ces zones sont non seulement sombres, mais peuvent également comporter des occlusions. La corrélation est donc moins bonne à cet endroit là.

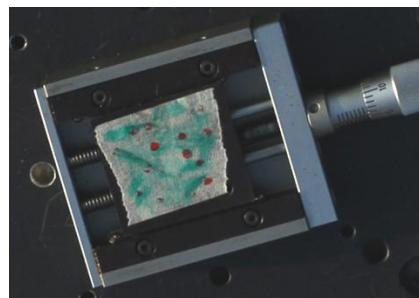


Figure 36 : Détail de la platine

La partie la plus intéressante est le morceau de papier scotché sur la platine. Il a été texturé pour que la corrélation soit meilleure. Son déplacement, connu, est celui que nous allons chercher à retrouver. La parallaxe transverse y est homogène, et plus élevée qu'au sol. Elle avoisine les 4 pixels, soit environ 400 µm. C'est une valeur cohérente lorsqu'on sait qu'elle représente une projection d'un déplacement de 500 µm.

### 3-4-3 Déplacements calculés

Les différents programmes IDL développés ont été appliqués à ces résultats de corrélation afin d'inverser le déplacement du papier. Une inversion 3D et une inversion 2D ont été réalisées. Pour réduire les temps de calcul, nous n'avons pas utilisé l'ensemble des images : un masque a été créé autour de la platine et seuls les pixels au sein de ce masque ont été traités. Nous nous sommes intéressés aux résultats obtenus sur les pixels au niveau du papier car c'est l'élément dont nous connaissons le déplacement.

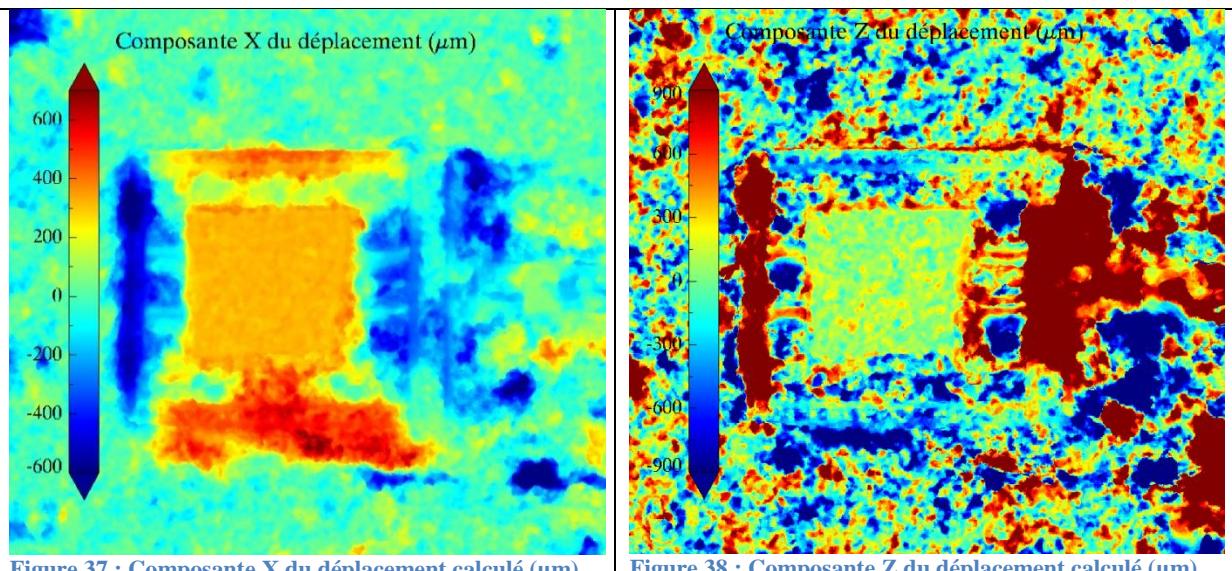
Les moyennes obtenues pour les différentes composantes sont difficiles à évaluer car nous ne connaissons que la norme du déplacement réel. S'il n'est pas possible de déterminer un biais, nous pouvons toutefois étudier l'écart-type de chaque composante.

Composante	Ecart-type ( $\mu\text{m}$ )	Ecart-type (pixel)
X	10	0.10
Y	15	0.15
Z	91	0.91
Norme	24	0.24

Tableau 6 : Ecart-types sur les composantes du déplacement calculé au niveau du papier lors de l'inversion 3D

#### Inversion 3D :

On constate que les composantes planimétriques sont bien moins bruitées que la composante verticale. Alors que les premières ont un écart-type de l'ordre de 0.1 pixel, l'écart-type de Z atteint 0.9 pixel, ce qui est supérieur à la précision espérée de 0.1 pixel. Ce phénomène est bien visible lorsqu'on compare les Figure 37Figure 38.



Le bruit de la composante Z s'est transmis lors du calcul de la norme du déplacement. Cette dernière hérite ainsi d'un écart-type de 0.24 pixel.

La norme 3D moyenne obtenue est de 540  $\mu\text{m}$ . La détermination de la norme est donc biaisé de 40  $\mu\text{m}$ , soit 0.4 pixel, ce qui est élevé comparé à la précision attendue.

#### Inversion 2D :

Concernant l'inversion 2D, les écart-types sur les composantes X et Y sont les mêmes : 10  $\mu\text{m}$  pour X, 15  $\mu\text{m}$  pour Y. La norme planimétrique obtenue est également biaisée par une valeur élevée. En effet,

on sait qu'elle doit être inférieure à 500 µm, or la moyenne obtenue pour cette norme est de 525 µm. Elle est donc caractérisée par un biais supérieur à 0.25 pixel. Cependant, elle est beaucoup moins bruitée que la norme 3D car elle n'est pas affectée par le bruit sur la composante Z (voir Figure 39 Figure 40). Son écart-type est ainsi de 15 µm, soit 0.15 pixel, ce qui est plus proche de la précision de 0.1 pixel espérée.

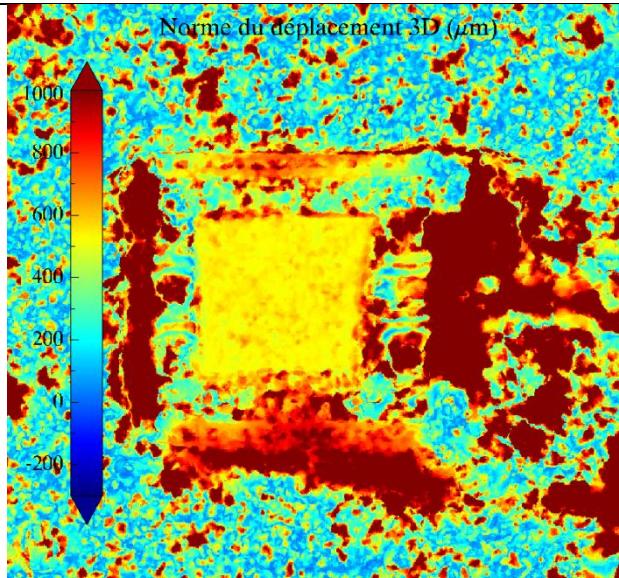


Figure 39 : Norme obtenue lors de l'inversion 3D (µm)

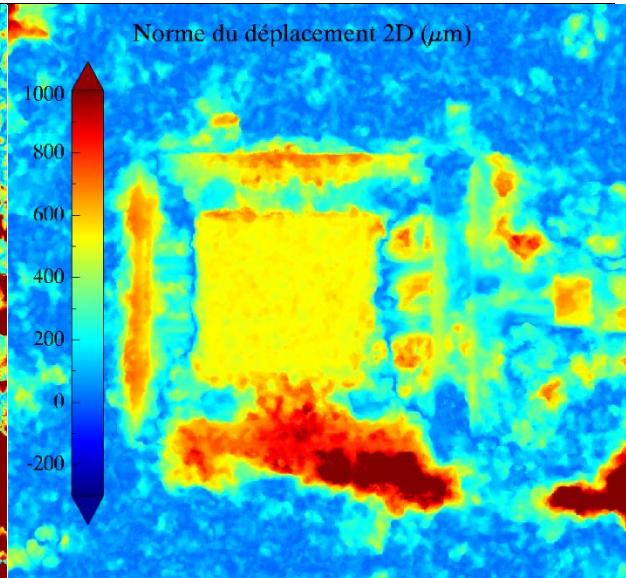


Figure 40 : Norme planimétrique obtenue lors de l'inversion 2D (µm)

Les composantes planimétriques calculées avec les deux inversions ont des moyennes très proches : la différence n'excède pas les 3 µm. L'inversion 2D peut ainsi fournir des résultats de la même qualité que l'inversion 3D.

Les normes étant fortement biaisées, il semble que les composantes du déplacement le soient aussi. Ce biais peut s'expliquer par la qualité limitée de l'orientation et ses résidus de 0.3 pixels. Les erreurs de modélisation ont entraîné un biais de corrélation, puis un biais dans le calcul des déplacements, comme nous le craignions.

### 3-4-4 Conclusion

Cette expérience a permis de montrer que la méthode fonctionnait, car bien que les résultats obtenus soient biaisés à cause des défauts d'orientation et de calibration, ils étaient toutefois plutôt précis : les écarts-types des composantes planimétriques étaient compris entre 0.10 et 0.15 pixel, que se soit en inversion 3D ou 2D. Or nous nous attendions au mieux à avoir une précision de 0.10 pixel. Nous avons également constaté que l'inversion 3D et l'inversion 2D fournissaient le même type de résultats sur les composantes planimétriques.

L'expérience permet surtout de mettre en avant les contraintes qui caractérisent la méthode. Les modélisations de la calibration et de l'orientation des prises de vue doivent être précises sous peine d'entraîner un biais sur les résultats du calcul de déplacements. On a vu que la calibration de WordlView n'était pas de qualité suffisante, toutefois, les images du satellite Pléiades seront bien mieux calibrées.

## Chapitre 4 : Simulations

Une simulation a été mise en place afin de calculer la sensibilité de la méthode. Il s'agissait de simuler les conditions de l'expérience réalisée avec la platine afin d'estimer la précision que l'on peut espérer obtenir et de tester l'influence de certains paramètres, tels que le bruit de corrélation.

### 4-1 Principe et objectif

La simulation consistait à écrire un programme qui restituait une situation la plus proche possible de l'expérience. Ce dernier créa un ensemble de points dans l'espace et leur impose ensuite un déplacement. C'est ce déplacement d'origine qu'on cherchera par la suite à retrouver. Les prises de vue des images n'ont pas été simulées car nous disposions déjà des fichiers d'orientation et de calibration des vraies photographies. Grâce à ces données, il a été possible calculer les directions  $u_3$  selon lesquelles les parallaxes transverses représentent les projections des déplacements. Les déplacements de la simulation ont été projetés sur ces directions afin de simuler des observations de parallaxe transverse. A ce moment, nous disposons donc de points objets, de prises de vue selon lesquelles ces points auraient été photographiés, de directions de projection et de parallaxe transverse. Afin de simuler une situation réaliste, du bruit a été rajouté sur les observations, c'est-à-dire sur les parallaxes transverses.

Le programme de simulation calcule enfin les déplacements de chaque point à partir de ces données simulées. L'objectif était de comparer les déplacements calculés aux déplacements d'origine afin de déterminer si la méthode fonctionne et d'évaluer la qualité des résultats qu'elle fournit. Nous avons ainsi testé des inversions 3D mais aussi 2D. En effet, nous souhaitions savoir si la méthode permettait de retrouver uniquement les composantes planimétriques d'un déplacement. Les parallaxes transverses représentent normalement les projections des déplacements 3D. On va donc chercher à savoir si ignorer la composante verticale du déplacement induit une erreur dans le calcul des composantes planimétriques. Cette inversion 2D serait très intéressante car elle nécessite moins d'images. Les simulations avaient également pour but d'évaluer l'influence de certains paramètres : le bruit d'observation, le nombre de couples à disposition et la composante verticale du déplacement. Ce dernier élément est surtout intéressant à étudier dans le cas de l'inversion 2D. On pourra estimer comment se comporte le calcul planimétrique si lorsque la composante verticale augmente.

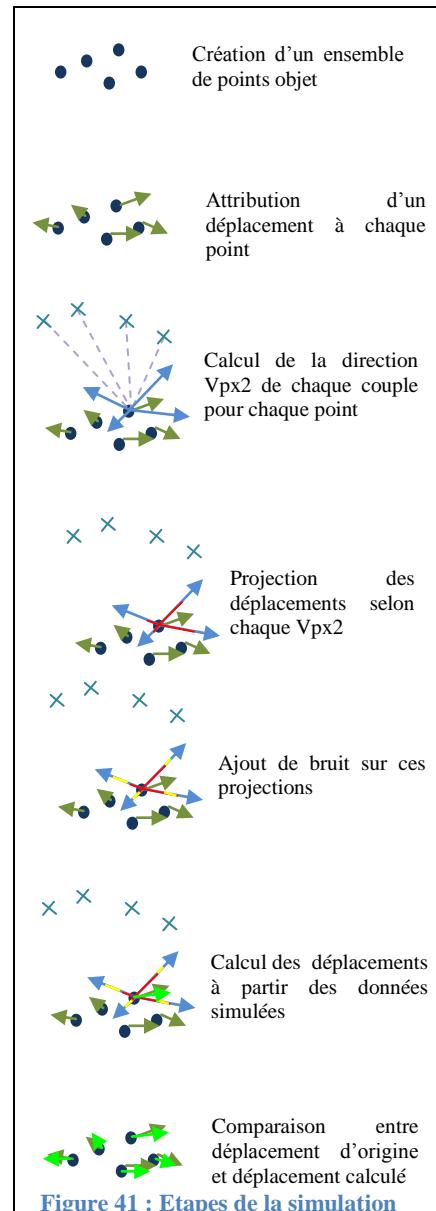


Figure 41 : Etapes de la simulation

Pour évaluer la réussite et la qualité des résultats, nous nous appuierons sur le bruit et le biais observés à l'issue des calculs.

### 4-2 Mise en place

La simulation devait recréer les conditions de l'expérience au cours de laquelle une platine de micro contrôle avait été utilisée.

#### 4-2-1 Prises de vue

Tout d'abord les orientations et calibration des images réelles de l'expérience ont été réutilisées. Cela permettait de disposer d'un ensemble de prises de vue réaliste. 59 photographies de la platine avaient été réalisées et traitées, mais pour les simulations il fallait choisir un jeu quatre prises de vue et un autre de trois. Le premier a servi pour la simulation de calcul de déplacement 3D, le second pour l'inversion d'un déplacement 2D (voir Figure 42 et 43). Comme lors du traitement des images de la platine, les dispositions des prises de vue ont été choisies afin de représenter des configurations pertinentes d'images satellites. Ainsi, la désignation des images avant et après a été réalisée de manière à respecter les trajectoires des satellites : les images 1169 et 1185 ont été utilisées comme des images avant déformations, et les images 1174 et 1180 comme des images acquises après le déplacement.

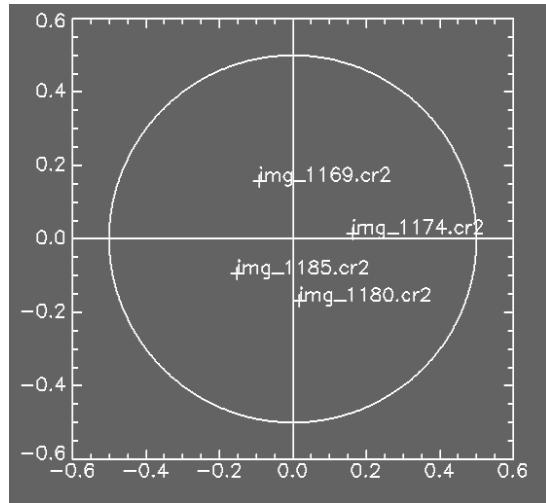


Figure 42 : Configuration des quatre prises de vue

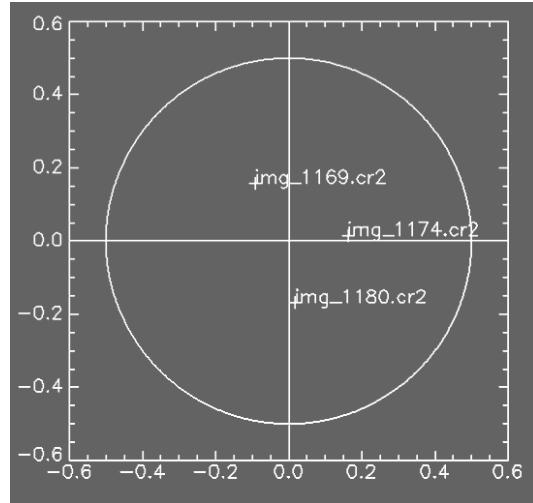
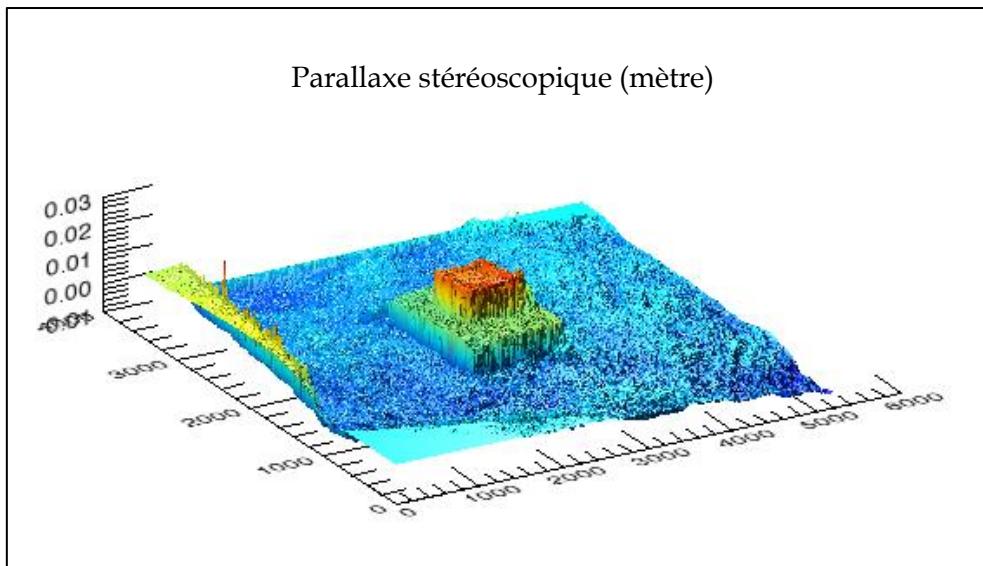


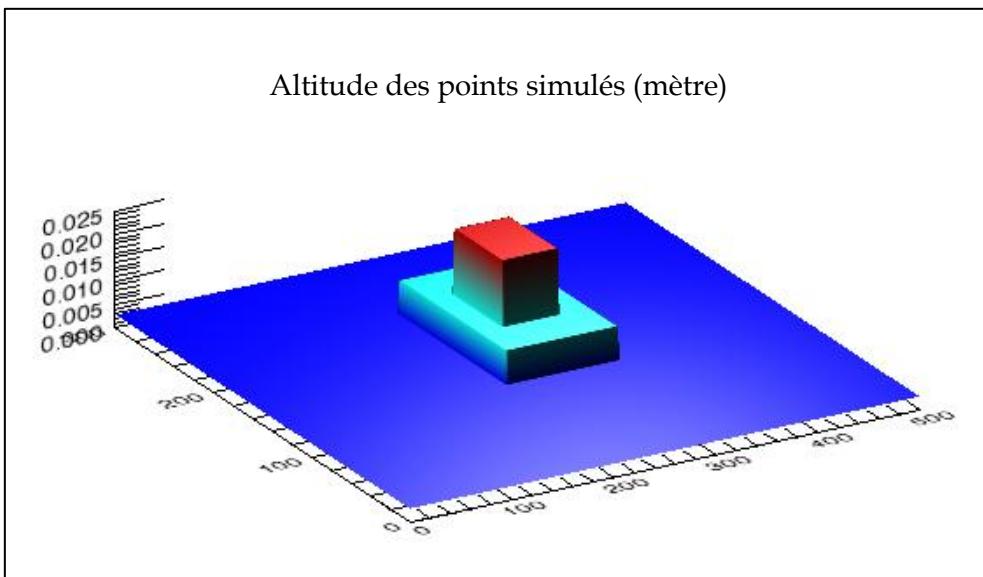
Figure 43 : Configuration des trois prises de vue

#### 4-2-2 Points objets

Les points objets simulés ont également été créés proches de la réalité. Un sol a été défini, à la même distance des prises de vue que dans la réalité. La platine a également été simulée. Le but était d'obtenir des coordonnées 3D dans le même repère que celles des prises de vue. Pour cela, nous avons utilisé l'image nadir. Un quadrillage de l'image a été effectué tous les 10 pixels. Puis les coordonnées espace des pixels ainsi sélectionnés ont été calculées. Cela nous a fourni une grille de points 3D, avec un pas de 1mm. Les images réelles sont de taille 5202 x 3465 pixels, notre grille regroupe un ensemble de 500 x 300 points. On retrouve ainsi un ensemble de points proche de l'objet photographié (voir Figure 44 et 45).



**Figure 44 : Altitude des points calculée avec la parallaxe stéréoscopique un couple d'images. Taille : 5202 x 3465 pixels.**



**Figure 45 : Altitude créée pour la simulation des points 3D. Taille : 500 x 300 points. On n'a gardé qu'un pixel sur dix par rapport aux images originales.**

Les points 3D simulés comptent trois niveaux d'altitude : 3 mm pour le sol, 10 mm pour la partie basse de la platine et 24 mm pour la partie haute. Cette dernière partie nous intéresse particulièrement car elle représente le papier scotché sur la platine lors de l'expérience terrain. C'est donc sur cet ensemble de 55 x 50 points, soit 2750 points, que le déplacement a été appliqué.

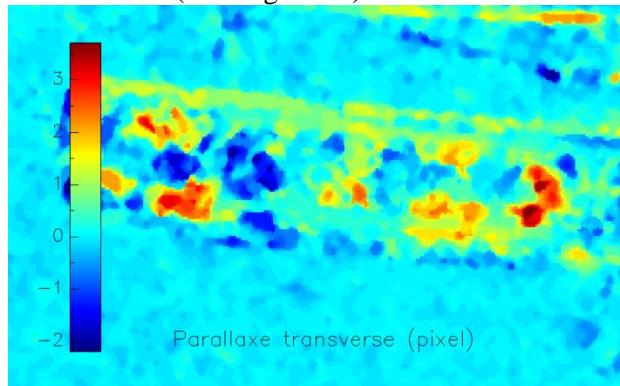
#### 4-2-3 Déplacements

Les déplacements simulés ont également été réalisés d'après la réalité terrain. Pour chaque simulation, une translation d'une norme de 500 µm a été appliquée sur la partie haute de la platine, comme ce fut le cas lors de l'expérimentation.

#### 4-2-3 Bruit de mesure

Le plus compliqué à simuler a été le bruit sur les observations. Il était difficile d'évaluer cette quantité car de nombreux paramètres influencent la qualité de la mesure. Tout d'abord lors de l'acquisition, les

images sont erronées par un bruit de mesure. Ce dernier est lié à la taille du capteur, à la sensibilité utilisée, la luminosité de la scène, la stabilité de l'appareil lors de chaque acquisition... Puis, lorsque les images sont traitées avec Apero, il en résulte des erreurs de modélisation. La calibration et l'orientation des images ne sont pas parfaites et induisent par la suite du bruit dans le calcul des parallaxes. Le bruit de corrélation est donc composé d'une partie due au bruit d'acquisition et aux erreurs de modélisation et d'une partie due au contenu de l'image. Dans une zone homogène, la corrélation est sujette à plus d'erreurs car il est plus difficile de différencier un pixel de son voisin et donc d'identifier avec justesse son pixel homologue parmi tous les pixels de la zone. Il est donc plus fréquent que le corrélateur se trompe de point homologue, et donc calcule des parallaxes faussées. On retrouve le même problème dans les zones sombres ; quand il n'y a pas assez de texture, le corrélateur n'arrive pas à « accrocher » les points. Le corrélateur fait également des erreurs lorsqu'il y a des objets périodiques. Ainsi, on retrouve des erreurs de parallaxe au niveau des graduations de la règle : le programme corrèle sur le mauvais trait (voir Figure 46).



**Figure 46 : Parallaxe transverse calculée à partir du couple d'image 1169/1205. Zoom au niveau de la règle.**

Le bruit a été déterminé de manière empirique avec les parallaxes transverses calculées d'après les images réelles. Les résultats de quinze couples ont été analysés afin d'évaluer le bruit final que l'on peut avoir sur la parallaxe transverse, en fonction du B/H. En effet, plus les images ont un fort B/H, moins elles risquent de bien corréler.

Trois séries de couples de B/H croissants ont été utilisés. Rien de remarquable ne distinguait ces séries ; nous en avons étudié plusieurs pour vérifier que les bruits observés étaient cohérents entre eux d'une série à l'autre. Pour chaque couple, une analyse de la parallaxe transverse a été effectuée afin de déterminer le bruit qui l'entachait. Nous avons ainsi obtenu trois courbes de bruit de corrélation en fonction du B/H (voir Figure 47). Les résultats ont montré une tendance similaire : le bruit de corrélation augmente lorsque le B/H croît. Grâce à ces courbes, il a été possible de déterminer un bruit sur les observations pour les prises de vue utilisées lors des simulations. Afin de ne pas se montrer trop optimistes, nous avons choisi de simuler le bruit de chaque B/H de la simulation avec la plus forte valeur observée. Avec les B/H des couples des simulations, cela donne un bruit moyen de 0.1 pixel, soit environ 10 µm.

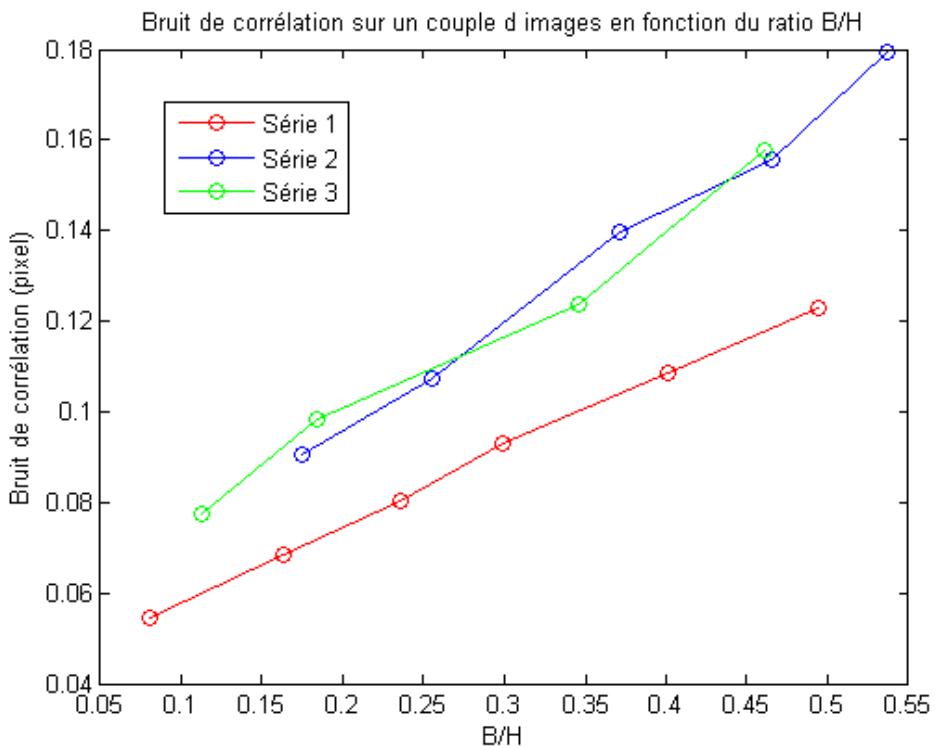


Figure 47 : Bruit entachant la parallaxe transverse d'un couple d'images en fonction du B/H du couple.

### 4-3 Résultats

#### 4-3-1 Paramètres testés

Deux situations de départ ont été testées, puis nous avons fait évoluer différents paramètres afin d'évaluer leur influence sur le résultat. Pour ces deux premières simulations, les quatre couples d'images ont été utilisés. La norme du déplacement était de 500.0 µm, avec une composante z bien inférieure aux coordonnées planimétriques (voir Tableau 7). Le bruit a été défini avec un écart-type de 10.0 µm. Seules les valeurs des composantes x et y distinguaient les deux situations de base.

Nombre de couples d'images	Bruit moyen sur la parallaxe transverse (µm)	Déplacement (µm)				
		X	Y	Z	Norme 3D	Norme plani
4	10	100.0	489.9	10.0	500.0	500.0
4	10	350.0	356.9	10.0	500.0	499.9

Tableau 7 : Situations 1 et 2 des simulations initiales

Nous avons ensuite augmenté le bruit sur les observations pour déterminer son influence sur les inversions.

Puis composante verticale, Z, a été augmentée, notamment pour évaluer son influence sur le calcul de la norme planimétrique. Nous avons étudié ce paramètre avec deux différentes configurations de prises de vue : une comprenant quatre images, l'autre n'en contenant que trois.

#### 4-3-2 Résultats sur deux situations de base

Pour chaque simulation, nous obtenons un déplacement pour chaque point objet. Les moyennes des 2750 déplacements inversés nous donnent les biais de chaque composante et de la norme. L'écart type, qui caractérise la précision des résultats, est également calculé lors de la simulation. Ce sont ces deux éléments que nous allons étudier car ils permettent de quantifier l'exactitude de nos résultats. Nous

savons que cette dernière peut au mieux atteindre 0.1 pixel, précision de corrélation maximale de MicMac.

Le Tableau 8 présente les biais obtenus. En les étudiant, on constate que les deux situations fournissent des résultats semblables.

	Biais - Inversion 3D ( $\mu\text{m}$ )				Biais - Inversion 2D ( $\mu\text{m}$ )		
	X	Y	Z	Norme 3D	X	Y	Norme plani
Situation 1	-0.1	-0.1	0.0	-4.2	0.2	0.2	0.3
Situation 2	0.1	0.1	0.1	-3.9	0.5	0.0	0.3

Tableau 8 : Biais sur les composantes et les normes du déplacement calculé

Les composantes du déplacement ont de très faibles biais, inférieurs à 0.2  $\mu\text{m}$ , soit 0.002 pixel. Ces biais se répercutent sur le calcul de la norme. Il paraît dès lors cohérent que la norme 3D soit l'élément qui compte les plus fortes valeurs de biais, et ce, dans les deux situations testées. La norme planimétrique n'est pas affectée par le biais de la composante Z. Par conséquent, elle est calculée plus justement que la norme 3D. Dans les deux situations étudiées, la méthode aboutit à donc des résultats assez justes. Avec des biais compris entre -4.2 et 0.3  $\mu\text{m}$ , soit environ -0.04 et 0.00 pixels, on reste bien inférieur à l'exactitude de 0.1 pixel espérée.

L'exactitude est certes caractérisée par la justesse mais également par la fidélité des résultats. Il nous faut donc étudier les écarts types obtenus afin d'évaluer l'exactitude de notre méthode. Là aussi les deux situations rencontrées présentent des résultats similaires (voir Tableau 9).

	Ecart type - Inversion 3D ( $\mu\text{m}$ )				Ecart type - Inversion 2D ( $\mu\text{m}$ )		
	X	Y	Z	Norme 3D	X	Y	Norme plani
Situation 1	7.2	10.0	64.2	12.2	6.8	10.0	10.5
Situation 2	7.2	10.1	63.6	11.9	6.7	9.8	9.9

Tableau 9 : Ecart type sur les composantes et les normes du déplacement calculé

L'écart-type des composantes planimétriques varie entre 6 et 10  $\mu\text{m}$ , soit 0.06 et 0.10 pixel, ce qui est de l'ordre de grandeur de la précision espérée. En revanche, la composante Z est très bruitée : on obtient un écart-type en Z compris entre 60 et 70  $\mu\text{m}$ , soit environ entre 0.6 et 0.7 pixel. C'est un résultat auquel on s'attendait. En effet, les vecteurs directeurs des rayons perspectifs ont une composante verticale forte devant les composantes planimétriques. Ainsi, le produit vectoriel de ces deux vecteurs hérite d'une faible composante verticale. La parallaxe transverse est donc une projection du déplacement selon des vecteurs ayant des composantes verticales réduites comparée aux composantes planimétriques. De ce fait, lors de l'inversion, la coordonnée Z du déplacement est la moins bien déterminée.

On remarque que l'écart-type en planimétrie est du même ordre de grandeur que le bruit de corrélation introduit sur les observations (environ 10  $\mu\text{m}$ ), ce qui semble cohérent : le bruit de corrélation a été transmis lors de l'inversion ;

De part la transmission d'erreur, la norme 3D est affectée par les erreurs sur les différentes coordonnées. Son écart-type est d'environ 12  $\mu\text{m}$ , soit 0.12 pixel. Non entachée par le fort écart-type en Z, la norme planimétrique a un écart-type un peu plus faible : environ 0.10 pixel.

Maintenant que l'on connaît les biais et les écarts-types, on peut calculer l'exactitude des composantes et des normes. L'exactitude d'une grandeur est caractérisée par son emq.

$$\text{emq} = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2} \quad [23]$$

Avec emq : erreur moyenne quadratique, caractérise l'exactitude

$\sigma$  : écart-type, caractérise la précision ou fidélité

$\beta$  : biais à caractère systématique, caractérise la justesse

On constate que souvent le biais est négligeable par rapport à l'écart-type (voir Tableau 10).

	emq - Inversion 3D ( $\mu\text{m}$ )				emq - Inversion 2D ( $\mu\text{m}$ )		
	X	Y	Z	Norme 3D	X	Y	Norme plani
Situation 1	7.2	10.0	64.2	12.9	6.8	10.1	10.5
Situation 2	7.2	10.1	63.6	12.5	6.8	9.8	9.9

Tableau 10 : emq sur les composantes et les normes du déplacement calculé. En orange, emq non égale à l'écart-type.

Les emq sont soit égales aux écarts-types soit légèrement supérieures. La composante verticale est mal déterminée par rapport aux coordonnées planimétriques, la norme 3D présente donc une moins bonne exactitude que la norme planimétrique.

Ces résultats sont assez satisfaisants. Pour l'inversion 3D, la norme du déplacement est calculée avec une exactitude légèrement supérieure à 0.1 pixel. Les composantes X et Y sont déterminées avec une précision proche de 0.1 pixel, du même ordre de grandeur que le bruit des observations. L'inversion de Z est moins réussie, avec une précision finale de 0.71 pixel.

L'inversion 2D a également réussi : on a retrouvé les bonnes valeurs des composantes planimétriques. Leurs emq sont très proches de celles observées sur les composantes planimétriques lors de l'inversion 3D. La norme planimétrique a même été calculée avec plus d'exactitude que la norme 3D, à cause de la coordonnée Z moins précisément calculée.

Les deux situations de base ont donc montré que la méthode permettait d'atteindre l'exactitude attendue. Il s'agit maintenant d'évaluer son rendu si l'on fait évoluer certains paramètres comme le bruit d'observation.

#### 4-3-3 Analyses des influences des paramètres testés

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à une configuration de quatre images, donc quatre couples. Nous avons fait varier le bruit et l'importance de la composante Z pour évaluer leur influence sur le résultat.

##### Variation du bruit

Nous sommes partis d'une situation semblable aux situations précédentes (voir Tableau 11), puis nous avons petit à petit augmenté le bruit afin de voir son influence sur les résultats. L'écart-type du bruit a évolué de 10 à 75  $\mu\text{m}$ . Les composantes ont gardé les mêmes valeurs tout le long du test, afin qu'un seul paramètre évolue à la fois.

Nombre de couples d'images	Bruit moyen sur la parallaxe transverse ( $\mu\text{m}$ )	Déplacement ( $\mu\text{m}$ )				
		X	Y	Z	Norme 3D	Norme plani
4	10	353.0	353.0	27.96	500.0	499.2

Tableau 11 : Situation initiale avant augmentation du bruit

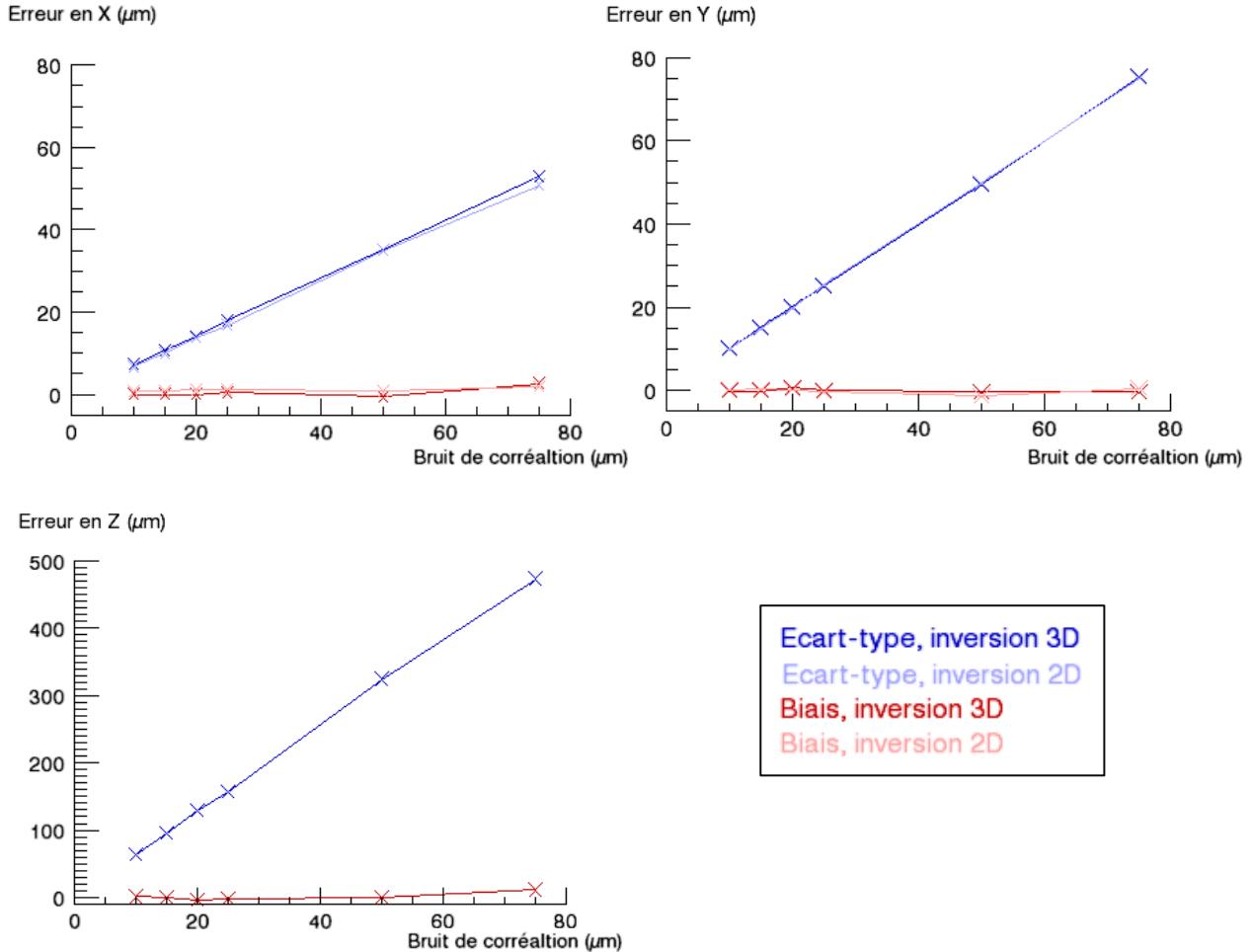


Figure 48 : Biais et Ecart-types obtenus sur les composantes des déplacements pour des inversions 3D et 3D ( $\mu\text{m}$ ). En foncé, les inversions 3D, en clair les inversions 2D. Remarque : la composante Z n'est pas calculée lors de l'inversion 2D ; elle est considérée comme nulle.

On constate tout d'abord que les biais sont constants pour chacune des composantes et restent négligeables par rapport aux écart-types. Les biais restent inférieurs à 0.05 pixels et pour la majorité des cas ils sont même inférieurs à 0.01pixel.

Pour toutes les composantes, plus le bruit d'observation augmente, plus la précision est dégradée. Le bruit de corrélation est ainsi transmis lors de l'inversion. Pour les composantes X et Y, les écarts-types sont assez proches du bruit introduit dans les mesures. L'écart-type de Y atteint 75.4  $\mu\text{m}$  pour un bruit d'écart-type de 75  $\mu\text{m}$ , tandis que celui de X avoisine les 52.9  $\mu\text{m}$ . La coordonnée Z est très fortement bruitée : son écart-type varie de 63.1 à 473.2  $\mu\text{m}$ , soit 0.63 à 4.732 pixel ! Très sensible au bruit de corrélation, cette composante est bien moins déterminée que les composantes planimétriques.

On constate que pour un bruit allant jusqu'à 20  $\mu\text{m}$  de moyenne, la précision des composantes n'est pas encore trop dégradée et reste aux alentours de 10  $\mu\text{m}$ , soit environ 0.1 pixel. La précision en X reste correcte, avec des valeurs comprises entre 7.1 et 14  $\mu\text{m}$ . La précision en Y est légèrement moins bonne, elle atteint les 20  $\mu\text{m}$ . A partir de 25  $\mu\text{m}$ , le bruit devient plus gênant et l'on perd la précision espérée de 0.1 pixel, sur toutes les composantes et sur la norme.

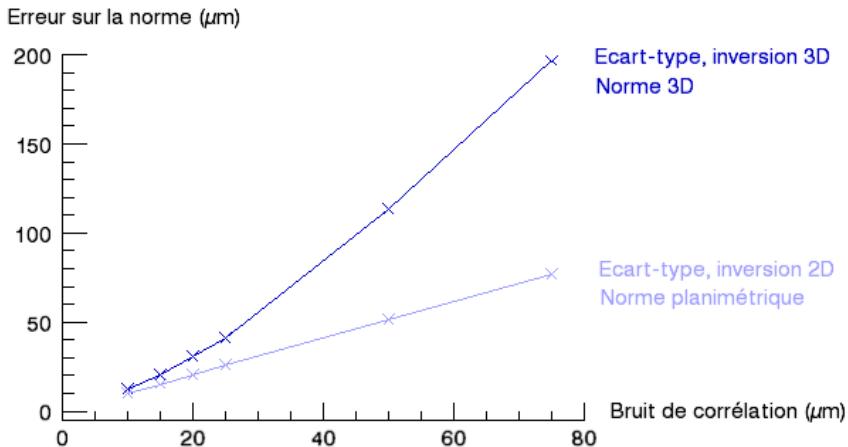


Figure 49 : Biais et écart-types obtenus sur la norme 3D et la norme planimétrique ( $\mu\text{m}$ )

Les normes voient également leurs précisions se détériorer avec l'augmentation du bruit de corrélation. Les normes 3D et planimétrique présentent cependant des caractéristiques différentes. La première est très fortement bruitée par rapport à la seconde : son écart-type est de fois et demi supérieur à l'écart-type de la norme 2D pour un bruit de corrélation de 75  $\mu\text{m}$ . Cela vient du fait que la norme planimétrique n'est pas calculée avec la composante verticale du déplacement, or c'est la coordonnée avec le plus fort écart-type. En revanche, lors de l'inversion 3D, le bruit sur Z se transmet sur la norme 3D. La norme planimétrique est donc moins sensible au bruit de corrélation que la norme 3D.

### Variation de la composante Z du déplacement

Il est également intéressant d'observer l'influence de la composante Z sur l'inversion 2D. En effet, cette coordonnée étant considérée comme nulle lors de l'inversion 2D, plus elle est importante plus grand sera le risque que le calcul de la planimétrie soit faussé.

Nous avons donc effectué différentes simulations en augmentant la valeur de la composante verticale, tout en gardant une norme de 500  $\mu\text{m}$  pour le déplacement. Nous avons testé la configuration précédente comprenant quatre images, et nous avons également étudié une configuration à seulement trois images en ôtant une image avant. Les Figure 50Figure 51 présentent les résultats de ces tests sur l'inversion 2D.

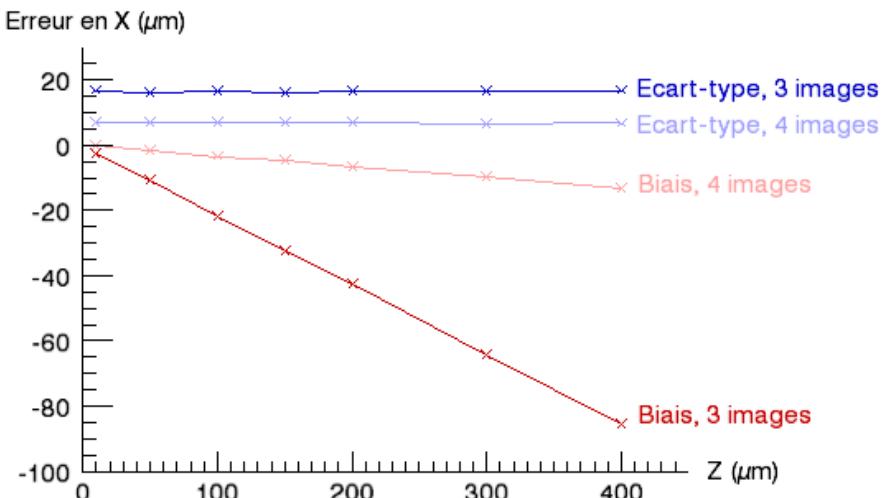


Figure 50 : Biais et écart-type obtenus en X ( $\mu\text{m}$ ). En foncé configuration de trois images, en clair, configuration de quatre images.

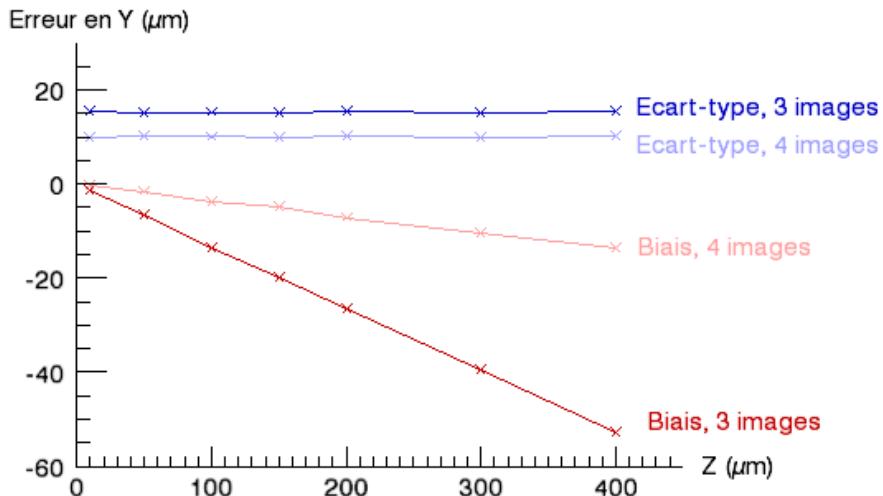


Figure 51 : Biais et écart-type obtenus en Y ( $\mu\text{m}$ ). En foncé configuration de trois images, en clair, configuration de quatre images.

Lors des deux simulations de base, les biais sont très faibles : 1  $\mu\text{m}$  en moyenne, soit 0.01 pixel. On a constaté qu'ils sont le plus souvent négligeables par rapport à l'écart-type et n'influent quasiment pas sur les emq (voir page 50). Cependant, lorsque la composante verticale du déplacement croît, on s'aperçoit que les biais augmentent également. Les biais sur les coordonnées X et Y passent d'une valeur de quasi nulle pour un  $Z$  égal à 10.00  $\mu\text{m}$ , à presque -15.00  $\mu\text{m}$  quand  $Z$  dépasse les 400  $\mu\text{m}$ . Les biais ne sont plus négligeables quand  $Z$  égale 150  $\mu\text{m}$  ; ils valent alors 0.05 pixel. Comme nous souhaitons obtenir des emq proches de 0.1 pixel, ces biais auront donc une influence à prendre en compte. Pour  $Z$  égale 1.50 pixel, X vaut 2.00 pixel. On peut donc considérer que les résultats sont biaisés lorsque la composante verticale avoisine les  $\frac{3}{4}$  d'une des composantes planimétriques.

Les biais engendrés sur les coordonnées planimétriques sont encore plus forts pour une inversion réalisée avec seulement trois images : ils atteignent -85  $\mu\text{m}$  en X et presque -55  $\mu\text{m}$  en Y pour un  $Z$  de 400  $\mu\text{m}$ .

Ces résultats s'expliquent par le fait que la composante verticale du déplacement est considérée comme nulle lors de l'inversion 2D. Dès lors que cette dernière n'est pas négligeable comparée aux composantes planimétriques, on commet une erreur sur l'inversion du déplacement. Les composantes planimétriques sont ainsi biaisées. Et ces biais engendrent à leur tour un biais sur la norme planimétrique (voir Figure 52 : Biais et écart-type obtenus sur la norme, avec quatre images et trois images ( $\mu\text{m}$ ). En foncé configuration de trois images, en clair, configuration de quatre images. Figure 52).

On constate que les écarts-types restent constants lorsque  $Z$  varie. Avec une configuration de quatre images, ils sont inférieurs à 0.10 pixel. Avec trois images seulement, on remarque également que les écart-types sont plus importants : plus 10  $\mu\text{m}$  en X et plus 5  $\mu\text{m}$  en Y. Ces résultats s'expliquent logiquement : moins on a d'observations moins on est précis.

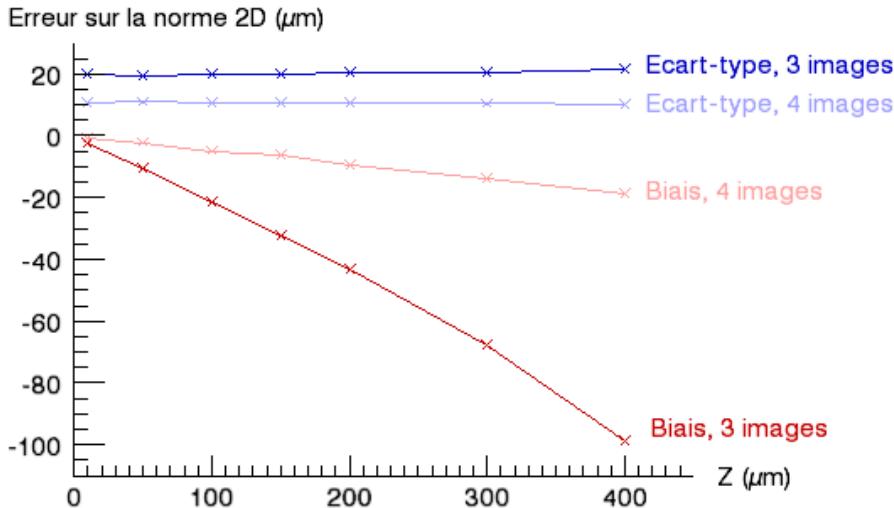


Figure 52 : Biais et écart-type obtenus sur la norme, avec quatre images et trois images ( $\mu\text{m}$ ). En foncé configuration de trois images, en clair, configuration de quatre images.

L'influence du  $Z$  se remarque bien sur la norme planimétrique. Son biais augmente de concert avec la composante verticale. Avec quatre images, elle débute avec une valeur de  $-0.06 \mu\text{m}$  pour la plus faible valeur de  $Z$ , elle descend jusqu'à près de  $20 \mu\text{m}$  pour un  $Z$  de  $412.31 \mu\text{m}$ . Ces 0.20 pixel ne sont donc plus du tout négligeables dans l'exactitude finale. Avec trois images, le biais sur la norme 2D sont encore plus importants : il atteint  $-100 \mu\text{m}$  pour un  $Z$  de  $412.13 \mu\text{m}$ .

L'inversion 2D est donc sensible à la valeur de la composante verticale du déplacement. Ainsi, si l'on soupçonne une déformation d'avoir une importante composante  $Z$ , mieux vaut éviter l'inversion 2D qui sera biaisée.

#### 4-3-4 Conclusion

Les simulations réalisées grâce au programme de simulation IDL ont permis de quantifier la sensibilité des inversions 2D et 3D de notre méthode. Nous avons également pu évaluer l'influence de trois paramètres : le bruit de corrélation, la valeur de la composante verticale du déplacement et le nombre d'images utilisées.

Pour évaluer l'exactitude de la méthode, nous nous sommes appuyés sur deux éléments : les biais et les écarts-types obtenus pour chaque composante et pour la norme à chaque simulation.

Pour des situations où le déplacement a une faible composante verticale comparé aux composantes planimétriques, les biais sont tous inférieurs à 0.05 pixels et en majorité ils sont même sous les 0.01 pixels. Ils sont donc faibles au vu des 0.10 pixel d'emq espérée. En revanche, lorsque la composante  $Z$  devient importante, l'approximation réalisée lors de l'inversion 2D n'est plus réaliste. Cette inversion présente alors des résultats biaisés. On a vu que quand  $Z$  avoisine les  $\frac{3}{4}$  d'une des composantes, les biais en planimétrie atteignaient 0.05 pixel.

Les écarts-types caractérisent la précision des résultats. Ils sont directement liés au bruit d'observation : le bruit de corrélation. Les composantes planimétriques ont un écart-type de l'ordre de grandeur du bruit de corrélation. Ainsi, pour obtenir une précision de 0.10 pixel il faudrait que le bruit de corrélation ne dépasse pas cette valeur. Cela est réaliste, car nous avons déterminé pour nos images un bruit de corrélation d'un écart-type de 0.10 pixel.

En revanche, la composante verticale est bien plus bruitée. Nous savions qu'elle serait la moins bien déterminée car les vecteurs  $u_3$  ont de faibles composantes verticales. La méthode développée n'est donc pas très bien adaptée pour le calcul de la composante verticale du déplacement.

## Conclusion et perspectives

### Conclusion

Le PFE s'est déroulé au sein du laboratoire de Télédétection, Surveillance et Environnement du CEA. Il s'inscrivait dans le cadre d'une collaboration avec l'IPGP autour de la problématique de mesure de déformations terrain par imagerie spatiale. Dans des contextes sismiques ou de glissement de terrain par exemple, il est important de pouvoir étudier les déplacements du sol afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu.

Il existe déjà une méthode exploitant des images satellites haute résolution spatiale (10 à 15 m) qui permet de mesurer des déformations avec une précision de 0.10 pixel, soit 1.0 à 1.5 m. Malheureusement, cette méthode n'est pas applicable aux images satellites à très haute résolution spatiale (0.40 à 0.80 m). En effet, les conditions d'acquisition de ces images sont différentes et engendrent de plus importants effets de relief dans le cas des images THR. De plus, il n'existe pas de MNT mondial avec une résolution assez fine pour permettre l'orthorectification de ces images ; les effets de relief ne peuvent donc pas être supprimés. D'autres méthodes ont été mises en place pour les images THR, mais elles comportent chacune leur faiblesse : soit elles ne sont utilisables que dans certains cas particuliers, soit elles ne permettent pas d'atteindre une précision subpixellique.

L'objectif du PFE est donc de développer une nouvelle méthode de mesure de déformations terrain à partir d'images THR. Cette méthode doit répondre aux contraintes des images satellites THR à l'aide de la géométrie épipolaire. Les corrélateurs permettent d'atteindre une précision de 0.10 pixel, le but est donc d'arriver à une précision proche de 0.10 pixel sur le calcul du déplacement. Si la méthode a au début été pensée pour les images satellites, elle peut également être appliquée aux images aériennes et terrestres.

Pour mettre en place cette nouvelle méthode, nous avons étudié un couple d'images, l'une acquise avant déplacement, la seconde après. L'innovation repose sur l'exploitation de la parallaxe transverse. Cette dernière est la composante de la disparité entre deux points homologues, le long de la direction perpendiculaire à la droite épipolaire. Le corrélateur MicMac, utilisé au CEA, calcule la parallaxe stéréoscopique (le long de la droite épipolaire) et la parallaxe transverse. Lors du PFE, nous avons démontré que cette parallaxe transverse était la projection du déplacement selon une direction particulière connue : la direction orthogonale au plan épipolaire. Cette théorie a non seulement été démontrée mais également validée avec un programme IDL.

Ainsi, un couple d'images avant/après fournit une projection du déplacement, selon une direction calculable. En théorie, il suffit donc de disposer d'au minimum trois couples avant/après pour inverser un déplacement 3D et retrouver ses trois composantes. Cela nécessite donc au minimum quatre images. Pour pouvoir inverser le déplacement, il faut que les directions de projections ne soient pas coplanaires, sinon l'inversion ne pourra pas se faire. Il n'est donc pas possible d'utiliser configuration une image avant et trois après (et inversement). En effet, dans ce cas là les directions de projection sont toutes perpendiculaires à un même rayon perspectif et sont donc coplanaires. Pour une inversion 3D, il faut donc au minimum 4 images, dans la configuration deux images avant/deux après. Cette méthode est ainsi bien adaptée à l'acquisition de couples stéréoscopiques : on peut utiliser un couple stéréoscopique avant et un couple stéréoscopique après. Cette technique a l'avantage de garantir qu'il n'y a pas de déformation entre les deux images avant et entre les deux images après car les images d'un couple stéréoscopique sont acquis l'une juste après l'autre.

L'inversion 2D du déplacement a également été mise en place. Elle consiste à considérer la composante verticale du déplacement comme nulle et à assimiler la parallaxe transverse comme la projection du déplacement planimétrique uniquement. Il était intéressant de tester cette inversion car elle nécessite uniquement 2 couples avant/après, soit trois images.

Des algorithmes ont été écrits en IDL pour mettre en place la nouvelle méthode. Intégrés dans la chaîne de calcul du CEA, ils permettent notamment de déterminer le vecteur directeur des directions de projection à partir des modélisations de calibration et d'orientation produit par les logiciels du CEA, et de réaliser des inversions 3D et 2D des déplacements grâce aux parallaxes transverses calculées par le corrélateur MicMac. Cette méthode est intégrée dans la chaîne de traitement d'images du CEA.

Une fois la théorie en place, il s'agit de tester la méthode : vérifier qu'elle fonctionne et évaluer sa sensibilité. Pour cela, nous avons réalisé des expériences terrain et des simulations. Les premières nous ont permis de mettre en avant les contraintes posées par la méthode. Les secondes ont servi à déterminer sa sensibilité.

Les expériences n'ont pas été réalisées avec de réelles images satellites car ces dernières ont des défauts de calibration complexes à corriger qui auraient faussé les résultats d'inversion. Les images Pléiades devraient disposer d'une bien meilleure calibration interne que les images WordlView par exemple. La méthode a d'ailleurs été pensée pour être appliquée sur ces images. Cependant, les premières images Pléiades ont été commercialisées à partir du 4 juin 2012, un peu tard être utilisées lors du PFE, d'autant plus qu'il aurait d'abord fallut vérifier et tester leurs qualité de calibration. Nous avons donc utilisé des images terrestres. L'expérience principale a consisté à réaliser une série d'images d'une platine de micro contrôle, puis à effectuer une translation de 500 µm à la platine. Une seconde séquence d'images a été acquise après le déplacement. La graduation tous les 10 µm de la platine fournissait une première vérité terrain. Une deuxième vérité terrain a été obtenue avec des images réalisées par un autre appareil installé sur un trépied au nadir de la platine.

Nous avons calculé la calibration et les orientations des images grâce aux logiciels Tapioca et Apero, intégrés dans la chaîne de traitement du CEA. Puis nous avons corrélées quatre couples d'images grâce au corrélateur MicMac. Nous étions ainsi en possession de quatre parallaxes transverses, soit quatre projections de déplacement. Avec la parallaxe transverse déterminée par le logiciel pour chaque couple, nous avons inversé le déplacement de la platine.

Lors de l'inversion 3D, nous avons ainsi trouvé un déplacement moyen de 540 µm, soit 5.40 pixel. Le déplacement vrai étant de 5.00 pixels, la norme calculée présente un biais de 0.40 pixel. Ce biais s'explique par la qualité insuffisante de la calibration et des orientations : elles étaient en effet caractérisées par des résidus de 0.3 pixel. On pense que ces résidus proviennent du système optique qui a dû bouger entre les différentes prises de vue. L'expérience nous montre ainsi qu'il est nécessaire de modéliser très précisément la calibration et les orientations. Les écarts-types obtenus sont proches de ce qu'on espérait : 0.10 pixel en x et 0.15 pixel en y, alors qu'on souhaitait précision de 0.10 pixel. Seule la composante verticale est mal déterminée : elle présente un écart-type de 0.91 pixel. Cependant, nous nous attendions à ce résultat car les vecteurs des directions de projection ont de faibles composantes verticales. Il est donc plus difficile de retrouver précisément la coordonnée Z. L'expérience semble confirmer notre hypothèse de précision.

Nous avons également effectué une inversion 2D. La norme planimétrique comporte également un biais, supérieur à 0.25 pixel, ayant les mêmes origines que celui de la norme 3D. La précision obtenue sur les composante est la même que lors de l'inversion 3D : 0.10 pixel en x et 0.15 pixel en y pour les écarts-types.

Afin de quantifier la sensibilité de la méthode, des simulations ont été mises en place. L'expérience de la platine a été simulée : nous avons réutilisé les prises de vue des images réelles, simulé une translation de 5.00 pixels et introduit un bruit de corrélation déterminé à partir d'études des images des expériences. Ce bruit sur les observations avait un écart-type de 0.10 pixel. Nous avons effectué des inversions 3D et 2D.

Les simulations ont montré que le bruit sur les composantes planimétriques était du même ordre de grandeur que le bruit de corrélation. Par exemple, un bruit d'écart-type 0.10 pixel entraîne des écarts-types compris entre 0.06 et 0.1 pixel sur la détermination des coordonnées X et Y. Lorsque le bruit de

corrélation augmente, les écarts-types de X et Y augmentent de concert. En revanche, la composante verticale est très bruitée : elle est déterminée avec un écart-type de 6.42 pixel pour un bruit de corrélation d'écart-type 0.10 pixel. Cela provient de la configuration dans laquelle sont effectuées les mesures. Les capteurs dominent la scène de haut, leurs rayons perspectifs ont donc des composantes verticales importante. Par conséquent, le vecteur orthogonal à ces rayons a une faible composante verticale. Or, c'est selon ce vecteur que nous connaissons la projection du déplacement. La composante Z est donc la moins précisément inversée des coordonnées.

Nous avons testé la qualité de l'inversion 2D. Cette dernière consiste à négliger la composante Z du déplacement, aussi voulions nous tester son influence lorsqu'elle prend de l'importance par rapport aux composantes planimétriques. Nous avons ainsi constaté que quand Z atteint environ les 3/4 d'une des composantes X et Y, il en résulte un biais sur la détermination de X et Y de 0.05 pixel, ce qui n'est pas négligeable lorsqu'on souhaite obtenir une emq de 0.10 pixel. Plus l'importance de Z croît, plus l'inversion 2D est biaisée.

Le PFE a ainsi permis de mettre en œuvre une nouvelle méthode de mesure de déformations terrain à partir d'images très haute résolution spatiale. Cette méthode présente plusieurs avantages. Le plus important est qu'elle permet de s'affranchir de la connaissance du relief ; elle ne nécessite pas de disposer d'un MNT, ce qui était le principal critère à respecter. Elle a également l'avantage de permettre des temps de revisite journalier après un évènement, puisqu'elle ne nécessite pas que les images aient les mêmes prises de vue. De plus, les expérimentations et les simulations montrent qu'il est possible d'avoir des résultats non biaisés et d'atteindre une précision de 0.10 pixel en planimétrie. Toutefois, elles révèlent plusieurs contraintes et inconvénients qui caractérisent la nouvelle méthode. Les expériences ont montré qu'il était indispensable d'avoir une calibration interne des images et une modélisation des orientations très précises, sous peine d'obtenir des résultats biaisés. De plus, la composante verticale du déplacement est très bruitée. Enfin, l'inversion 2D est sensible à l'importance de la composante verticale du déplacement. La détermination sera meilleure si cette dernière est faible, comparée aux composantes planimétriques.

## Perspectives

La validation de la méthode a été réalisée sans images satellites, à cause de la complexité de leurs défauts. Les perspectives d'études sur le sujet devraient comprendre une analyse de la qualité des images THR, afin de déterminer la précision que permettraient d'atteindre ces images. Il serait très intéressant d'étudier précisément la qualité de calibration des images THR car nous avons vu que la calibration des images constituait un paramètre essentiel de la réussite. Il faudrait également étudier le bruit de corrélation des images THR. Comme l'écart-type du déplacement planimétrique dépend de ce bruit, il serait bon de l'évaluer afin de caractériser la précision sur les déplacements que l'on peut attendre de la part des images THR.

Le satellite Pléiades 1B, lancé le 17 décembre 2011, semble parfaitement adapté à la nouvelle méthode mise en place. En effet, il propose une très bonne calibration, meilleure que celle de WorldView par exemple. D'autre part, c'est un satellite très agile qui peut acquérir des images avec des angles de prises de vue variés. Cela permet un accès journalier en tout point du globe. Il offre également des capacités d'acquisition stéréoscopique, ce qui est bien adapté à notre méthode : un couple stéréoscopique avant déformation et un couple stéréoscopique réalisé après déformation constituent une configuration idéale. Le satellite est même capable d'effectuer de la tristéréoscopie. Enfin, il est le satellite THR le moins cher. Il serait donc judicieux et important d'étudier en priorité la qualité de ces images, de la manière dont nous l'avons décrit ci-dessous.

Une seconde perspective serait d'étudier la sensibilité de la méthode en fonction de la configuration des prises de vue. La précision des inversions des déplacements dépend en effet des B/H et des angles d'incidence des rayons perspectifs. Plus le B/H d'un couple est grand, plus l'angle entre  $u_1$  et  $u_2$  est grand et donc meilleure est la détermination de  $u_3$ . Et ainsi meilleure est la précision de l'inversion. Cependant, lorsque le B/H est important, cela signifie que les satellites ne voient plus la scène depuis

des points de vue proches et donc leurs images se ressemblent moins. Il y a de plus des risques d’occlusion. La corrélation sera donc moins bonne dans ce cas là. Les angles d’incidence des satellites ont également leur importance. Si le plan formé par  $u_1$  et  $u_2$  est quasiment à la verticale à la scène à imager,  $u_3$  sera presque dans un plan horizontal et aura une faible composante verticale. L’inversion du Z sera de mauvaise qualité. Plus ce plan sera incliné, c’est-à-dire plus les angles d’incidence des rayons perspectifs seront importants, plus  $u_3$  aura une forte composante verticale et donc meilleure sera la détermination de Z.

On voit donc que les paramètres B/H et angles d’incidence des satellites vont caractériser la précision de l’inversion. Il serait alors intéressant d’étudier leurs influences plus précisément. Ainsi, pour une configuration d’images donnée, il serait possible de connaître la précision que l’on peut atteindre.

## Bibliographie

- Ayoub, F, Leprince, S et Avouac, J.P. [2009], Co-registration and correlation of aerial photographs for ground deformation measurements. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 64. P 551-560.
- Bernstone, C et Heyden, A. [2009]. Image analysis for monitoring of crack growth in hydropower concrete structures. Measurement Vol.42. p878–893.
- Binet, R et Bollinger, L. [2003], Horizontal coseismic deformation of the 2003 Bam (Iran) earthquake measured from SPOT-5 THR satellite imagery. Geophysical research letters. Vol. 32. L02307, doi:10.1029/2004GL021897.
- Delacourt, C, Allemand, P, Casson, B et Vadon, H. [2004], Velocity field of the “La Clapiere” landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. Geophysical research letters. Vol. 31. , L15619, doi:10.1029/2004GL020193.
- Dominguez, S, Avouac J.P et Michel, R. [2003], Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images : Implications for the seismic cucle along the western foothills of central Taiwan. Journal of geophysical research. Vol. 108. p.1-19.
- Feigl, K.L, Sarti, F, Vadon, H, McClusky, S, Ergintav, S, Durand, P, Burgmann, R, Rigo, A, Massonet, D et Reilinger, R. [2002], Estimating Slip Distribution for the Izmit Mainshock from Coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT, and SPOT Measurements. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 92, No. 0. p.138-160.
- Fraser, C.S et Riedel, B. [2000], Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol. 55. p268–276.
- Käab, A. [2002], Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol. 57 . p39-52.
- Klinger,Y, Xu,X, Tapponnier,P, Van der Woerd, J, Lasserre, C et King,G. [2005], High-Resolution Satellite Imagery Mapping of the Surface Rupture and Slip Distribution of the Mw 7.8, 14 November 2001 Kokoxili Earthquake, Kunlun Fault, Northern Tibet, China. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 95, No. 5. p.1970-1987.
- Luhmann, T. [2010], ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 65. p558–569.
- Michel, M et Briole, P. [2007], Deformation between 1989 and 1997 at Piton de la Fournaise volcano retrieved from correlation of panchromatic airborne images. Geophys. J. Int. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03307.x
- Michel, R et Avouac, J.P. [2002], Deformation due to the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake measured from SPOT images. Journal of geophysical research. Vol. 107, No. 0. 10.1029/2000JB000102.

## **Sommaire des annexes**

**1 Précisions sur le logiciel Tapioca**

**2 Fonctionnement du logiciel Apero**

**3 Fonctionnement du logiciel MicMac**

**3-1 Décomposition en sections**

**3-2 Description des géométries possibles**

**3-3 Approche multirésolution, détails des paramètres MicMac**

**3-4 Résultats MicMac : interprétation**

## 1 Précisions sur le logiciel Tapioca

Tapioca propose plusieurs modes de calcul. Le mode All calcule les points homologues entre toutes les paires possibles d'un ensemble d'images. Le mode MulScale permet d'optimiser le temps de calcul. La première recherche de points homologues est effectuée à basse résolution. Puis le calcul est effectué à la résolution désirée uniquement pour les points dont le résidu n'a pas excédé un certain seuil à la première étape. Le mode Line est adapté aux images acquises le long d'une structure linéaire, comme c'est le cas des images aériennes. Enfin, le mode File permet de spécifier les paires dont on souhaite calculer les points homologues.

Les résultats sont enregistrés dans des fichiers ASCII. Il y a un répertoire pour chaque image, dans lequel on trouve un fichier de points pour chaque autre image de l'ensemble. Ainsi, le fichier Pastis\_vue2698.nef/\_vue2699.nef.dat contient l'ensemble des points homologues entre les images 2698 et 2699. Les lignes de ce fichier sont organisées en quatre colonnes x1 y1 x2 y2. Le couple 1 se réfère à l'image 2698 et le 2 à la 2699. Connaître la structure de ces résultats, permet d'utiliser n'importe quel générateur de points homologues ; il suffit d'organiser ses points de la même manière. Ils pourront ensuite être utilisés avec Apero.

## 2 Fonctionnement du logiciel Apero

Un fichier xml Apero est composé de plusieurs sections (voir Figure 1).



Figure 1 : Composition du fichier de paramètres xml d'Apero

La section compensation est la plus complexe car c'est la structure qui définit la stratégie de calcul (voir Figure 53).

```

<SectionCompensation>
  <EtapeCompensation>
    Chaque étape compensation est composée de plusieurs itérations et d'une partie
    observations.
    <Iterationscompensation>
      A chaque itération :
        - Linéarisation des équations
        - Résolution du système avec la méthode des moindres carrés
        - Mise à jour des inconnues avec les solutions précédemment calculées
      Pour chaque itération il est possible de geler ou libérer les inconnues que l'on veut.
      C'est-à-dire de choisir quelles inconnues on souhaite intégrer dans le calcul.
    <Iterationscompensation>
    <Iterationscompensation> <Iterationscompensation>
    ...
    <SectionObservations>
      Désignation des observations et définition de leurs paramètres pour l'ensemble de
      l'étape.
    <SectionObservations>
    <EtapeCompensation>
    <EtapeCompensation> <EtapeCompensation>
    ...
  <SectionCompensation>

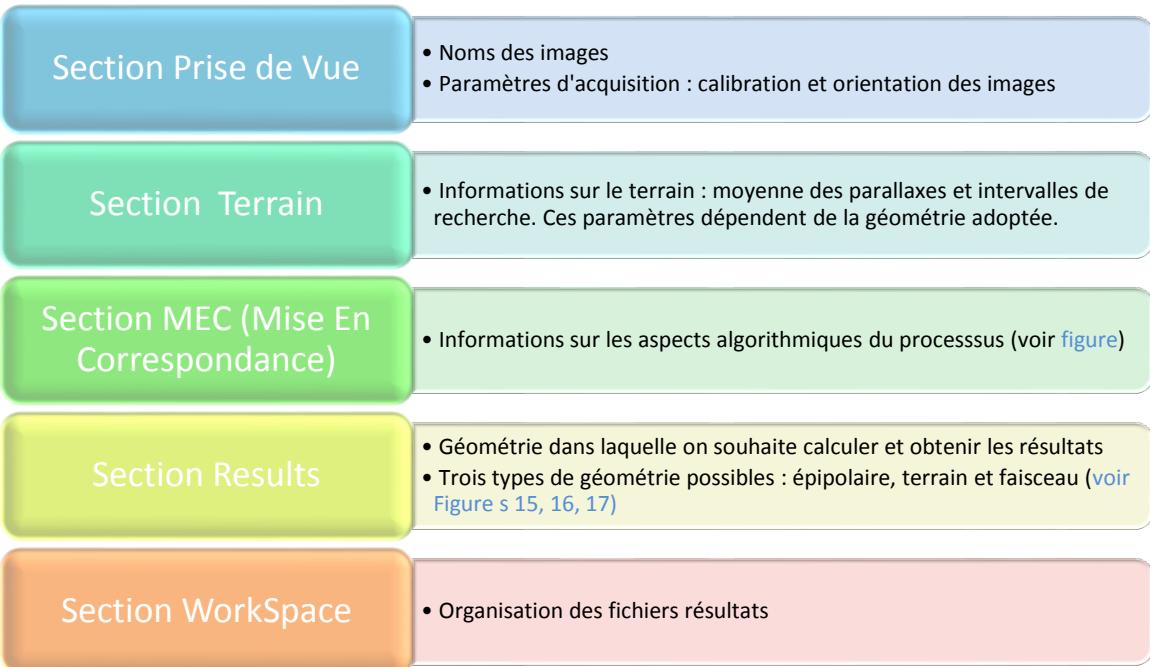
```

Figure 53 : Structure de la section Compensation

### 3 Fonctionnement du logiciel MicMac

#### 3-1 Décomposition en sections

Le fichier de paramétrage xml est également organisé en sections (voir Figure ).



**Figure 3 : structure du fichier de paramètres de MicMac**

### 3-2 Description des géométries possibles

#### Géométrie terrain :

La géométrie terrain peut être utilisée sur un ensemble d'images multisérotéscopiques. L'objectif est de connaître chaque point de l'espace en coordonnées 3D afin de calculer les coordonnées des pixels qui le représente dans chaque image. La soustraction entre ces coordonnées pixelliques fournit ensuite la disparité. MicMac travaille avec des images calibrées et orientées ; il connaît la position des prises de vue et l'altitude moyenne de l'ensemble de points photographiés. Pour chaque point  $M$  de l'espace objet, MicMac cherche à déterminer l'altitude du point. Pour cela, il fait « glisser »  $M$  le long de l'axe vertical  $Z$  (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ensuite, pour chaque position de  $M$  sur cet axe, le logiciel remonte dans les images et calcule les valeurs des différents pixels images de la position  $M$ . Lorsqu'il obtient le maximum de corrélation entre ces valeurs, il considère avoir trouvé l'altitude de  $M$ . Une fois qu'il dispose les coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  du point, MicMac connaît les coordonnées pixelliques de  $M$  pour chacune des images. Il lui suffit d'en faire la différence pour obtenir la disparité de chaque couple d'images. Cette géométrie correspond à une recherche selon une direction seulement. La disparité n'est donc calculée qu'en une dimension.

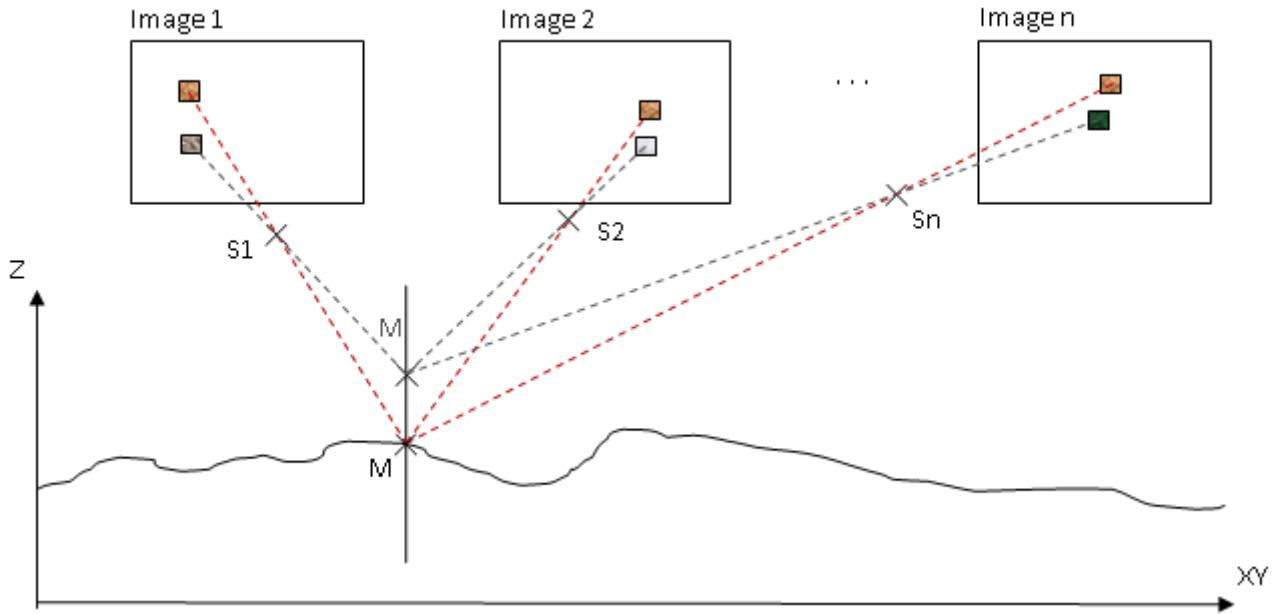


Figure 54 : Géométrie terrain

#### Géométrie épipolaire :

La géométrie épipolaire est un cas particulier. Elle ne permet de traiter que deux images simultanément. MicMac calcule pour chaque pixel d'une image, son pixel homologue sur la seconde image. Il cherche ce dernier le long de la droite épipolaire. La position qui obtient le maximum de corrélation permet de calculer la parallaxe stéréoscopique. Puis MicMac cherche perpendiculairement à l'épipolaire, afin de pouvoir déterminer la parallaxe transverse.

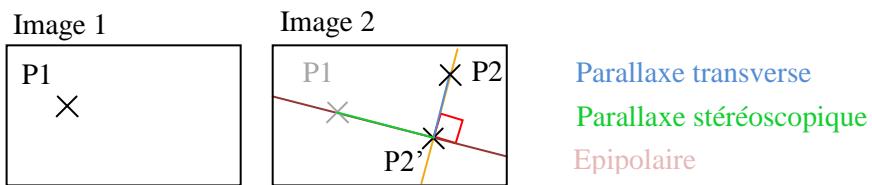
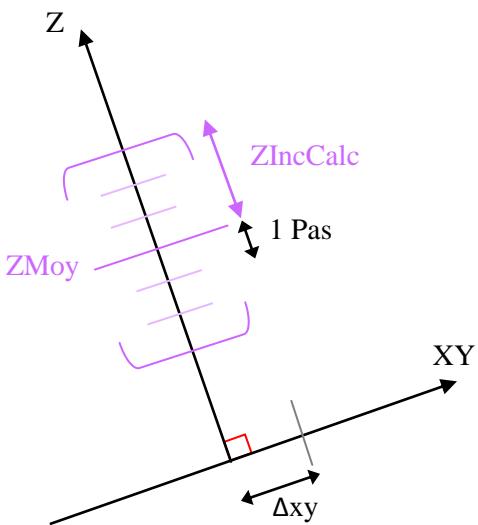


Figure 55 : Géométrie épipolaire

### 3-3 Approche multirésolution, détails des paramètres MicMac

Comme nous l'avons vu précédemment, qu'on soit en géométrie terrain ou faisceau, MicMac cherche la position du point objet M selon l'axe Z. Dans le premier, il s'agit de l'axe vertical, dans le second, c'est la direction du rayon perspectif. Le logiciel discrétise selon cet axe et teste chacune de ces positions de M. Si on est en géométrie terrain, tous les paramètres concernant le calcul de Z seront référencés avec un Z. Si on est en géométrie faisceau, ces paramètres seront caractérisés par un Px1, afin de les différencier des paramètres concernant px2.

Pour le premier DeZoom, MicMac discrétise l'axe Z dans la longueur de l'intervalle défini dans le fichier xml par les tags <ZIncCalc> ou <Px1IncCalc> (voir Figure 58). Cet intervalle est centré autour d'une valeur moyenne. Cette dernière est soit lue par MicMac dans les fichiers d'orientation d'Apero, soit précisée par l'utilisateur dans le tag <ZMoy> ou <Px1Moy>. Dans le cas où la géométrie permet de calculer la parallaxe transverse, on a les mêmes tags la concernant : <Px2IncCalc> et <Px2Moy>.



La taille du pas est également une notion importante ; elle est définie dans le fichier xml. On a :

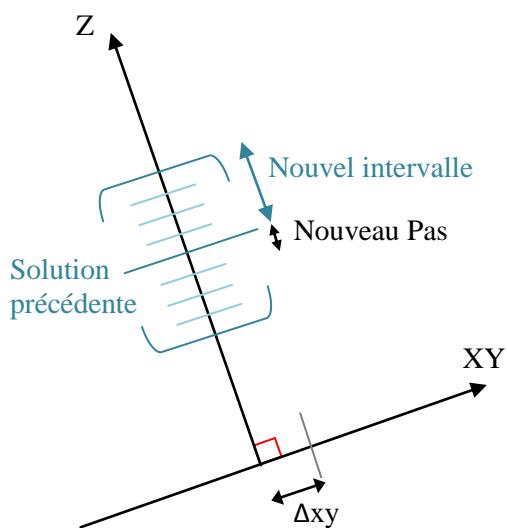
$$\text{taille du Pas} = Z\text{Pas} \times \Delta xy \quad [24]$$

Avec :  $\Delta xy$  la résolution planimétrique. En géométrie terrain, elle calculée par MicMac. En géométrie faisceau, elle correspond à la résolution de l'image d'origine, c'est-à-dire 1 pixel, à l'échelle du DeZoom. Ainsi au DeZoom 8  $\Delta xy = 8$  pixels de l'image d'origine.

$Z\text{pas}$  (ou  $\text{Px1Pas}$  et/ou  $\text{Px2Pas}$  en géométrie faisceau) le paramètre fixé par l'utilisateur. Il va déterminer la taille du pas.

Figure 56 : Discréétisation en Z pour le premier DeZoom.

Pour les DeZoom suivants, on zoome autour du point trouvé à l'étape précédente. Le  $Z\text{Pas}$  peut être redéfini à chaque étape. Attention toutefois à ne pas oublier le fait que  $\Delta xy$  change à chaque DeZoom. Pour ces étapes là, la longueur de l'intervalle est désignée par deux nouveaux tags : <DilatAlti> et <DilatPlani>.



Les DilatAlti et DilatPlani vont définir la taille du nouveau voisinage dans lequel l'exploitation se fera. Ils doivent être renseignés en pas. Sur la Figure 59, on a par exemple DilatAlti = 4 pas.

Figure 57 : Discréétisation en Z pour les étapes suivantes.

Une dernière spécificité de MicMac est paramétrable : la connaissance a priori de la régularité de la disparité. C'est-à-dire la disparité est plutôt susceptible d'avoir une surface continue, régulière ou marquée par des ruptures. Le logiciel propose différents algorithmes de régularisation. L'algorithme choisi est indiqué dans le tag <AlgoRegul>. S'il est bien choisi, ce paramètre permet de gagner du temps de calcul.

Simulations : 4 couples, augmentation du Z -> conséquence sur l'inversion 3D

### 3-4 Résultats MicMac : interprétation

Les chiffres que fournit MicMac ne peuvent directement être interprétés comme des altitudes. Pour obtenir l'altitude finale dans le repère utilisé il faut appliquer la formule suivante :

$$Altitude = p1 \times Résolution Alti + Origine Alti$$

[ 25 ]

Avec : p1, les comptes numériques fournis par MicMac

Résolution Alti, la résolution altimétrique obtenue par MicMac

Origine Alti, l'altitude moyenne de l'ensemble de points

Les deux derniers paramètres sont indiqués dans un fichier xml.

C'est une image dont le compte numérique de chaque pixel indique la valeur de la parallaxe transverse. Ces images sont organisées de la même manière que les images px1 : il y a des images 16 bits avec leurs copies au format 8 bits et on retrouve les mêmes combinaisons de DeZoom et Num. Dans le cas d'une géométrie faisceau, ce résultat est également dans la géométrie de l'image maître. Pour obtenir la valeur de la parallaxe transverse en pixel il faut appliquer la formule suivante aux résultats fournis par MicMac :

$$px2 = Px2moy + p2 \times Px2Pas \quad [ 26 ]$$

Avec p2 : le résultat fourni par MicMac

Px2Pas : le pas défini par l'utilisateur pour le DeZoom 1

Px2moy : la parallaxe moyenne autour de laquelle a été centrée la recherche de la première étape. Elle est définie par l'utilisateur.

px2 : la parallaxe transverse en pixel