

Objectif de la thèse

Les trois chapitres précédents ont mis en lumière les problématiques suivantes :

La société, par une législation (lois françaises de 1992 et 2006 sur l'eau), des politiques (Politique Nationale de l'eau au Québec en 2002) et des directives (européenne n° 2000/60/CE) récentes, s'est donnée l'obligation d'être capable de caractériser et de définir l'état écologique d'un cours d'eau, en se donnant comme objectif à terme un bon potentiel écologique pour tous les milieux aquatiques (section 2.1). Cette obligation constitue une nouvelle contrainte à prendre en compte dans la gestion des nombreux usages de l'eau dans des bassins versants qui concentrent de nombreuses problématiques comme celui de la Durance (voir chapitre 1).

D'autre part, la communauté scientifique a mis en évidence l'intérêt d'outils établissant le lien entre paramètres physiques de la rivière et réponse de la faune aquatique (section 2.2). Ces outils sont gourmands en données caractérisant la géométrie tridimensionnelle du lit de la rivière, et la télédétection apparaît comme un moyen de subvenir à ce besoin (sections 2.3 et 2.4).

Enfin, une revue des travaux relatant l'usage de la télédétection pour la caractérisation de la topographie immergée de la rivière ou la cartographie des profondeurs montre que la majeure partie des travaux porte sur la cartographie des profondeurs à partir de la couleur de l'eau - modèles radiométriques (chapitre 3). Des lacunes existent donc quant aux techniques actives ou encore la photogrammétrie à travers l'eau. De plus l'utilisation de moyens légers (drone, ULM) est très limitée. La recherche et le

développement de méthodes restent donc ouvertes dans ce domaine.

En conséquence, il convient d'évaluer le potentiel d'autres techniques de télédétection pour la mesure de la géométrie du lit de la rivière.

Surtout utilisé localement sur des transects, ou sur des rivières gelées, le GPR semble souffrir d'un besoin de calibration et d'une certaine expertise pour l'interprétation du signal [Creutin, 2001]. Son usage à partir de plateforme aérienne est encore du domaine de la recherche [Costa, 2001, Melcher et al., 2002].

L'une des techniques les plus prometteuses semble être le LIDAR bathymétrique, développé à l'origine pour des applications marines. Son utilisation en rivière n'est pour l'instant pas opérationnelle et fait l'objet de recherches dont le nombre s'accroît actuellement [Bailly et al., 2007, Hildale et Raff, 2007, Kinzel et al., 2007, Lesaignoux et al., 2007, Allouis et Bailly, 2008, Bailly et al., 2008, Hildale, 2008, Kinzel et al., 2008, Millar, 2008]. Les premiers instruments et algorithmes ont en effet une limitation pour les faibles profondeurs.

Il existe donc une "niche"¹ pour une technique pouvant être appliquée à des rivières de faible profondeur comme la Durance, le Gardon, ou la rivière du Gouffre. Il s'agit de l'utilisation de la stéréophotogrammétrie.

L'objectif de la thèse, résumé en une phrase, est le suivant :

Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie
immergée de rivière avec des moyens légers par
stéréophotogrammétrie à travers l'eau

Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière...

Comme on l'a rappelé plus haut, la caractérisation de l'état écologique des masses d'eaux, en particulier des rivières, a été rendue nécessaire par l'établissement de nouvelles législations, nationales et européennes. Le chapitre 2 a montré que cette pro-

¹méthodologique, et non pas écologique !

blématique (comme bien souvent en hydrologie) incluait *un problème de mesure*, plus précisément de mesure des paramètres physiques de la rivière, et notamment de la topographie immergée.

Notre travail sera centré sur l'étude de la partie *immergée* de la rivière.

... avec des moyens légers...

Comme il a été précisé dans la section 2.3, une des principales limitations de la méthode de mesure sur le terrain est son coût [Marcus, 2002]. Si la mesure de la topographie immergée par lidar bathymétrique paraît prometteuse, elle conserve l'inconvénient d'être coûteuse et reste en cours de qualification pour les très faibles profondeurs [Lesaignoux et al., 2007, Allouis et Bailly, 2008, Bailly et al., 2008, Kinzel et al., 2008, Millar, 2008]. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier le potentiel d'une technique utilisant des moyens moins onéreux tels que le drone ou l'ULM. Quelques travaux utilisant la radiométrie pour l'estimation de la profondeur ont déjà été réalisés [Chaponnière, 2004, Lejot et al., 2007].

Un deuxième avantage de telles techniques est la flexibilité de leur utilisation. Cette caractéristique, requise dans le cas où l'on veut pouvoir effectuer une acquisition avec une bonne réactivité vis à vis des conditions terrain, est détaillée dans le chapitre 6.

... par stéréophotogrammétrie à travers l'eau

Comme on l'a vu plus haut, les techniques passives basées sur la couleur de l'eau sont les plus largement répandues. Il y a donc un manque d'expérience en matière d'utilisation de stéréophotogrammétrie à travers l'eau pour mesurer la topographie de rivière.

Or, dans le cas de rivières régulées, où d'une part les problématiques d'optimisation des usages de l'eau sont fortes, et d'autre part la profondeur est relativement faible, avec des périodes où l'eau est très transparente, il est intéressant d'évaluer le potentiel de cette méthode.

Cette méthode présente la particularité d'étudier le trajet de rayons lumineux dans deux milieux différents (air et eau). Les phénomènes de réfraction à travers la surface de la rivière devront donc être pris en compte.

Bilan : Le coeur de ce document est consacré à l'examen de la faisabilité et au développement d'une méthode de mesure par stéréophotogrammétrie à travers l'eau avec des moyens d'acquisition légers. Il s'agit de savoir d'une part si l'on peut fournir des données de topographie immergée par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. D'autre part, la qualité de la mesure obtenue sera évaluée par validation croisée avec des données de terrain indépendantes.

Enfin, l'intérêt, le potentiel, et le cadre d'application d'une telle méthode, ainsi que les perspectives dégagées par les résultats obtenus seront discutés.

Deuxième partie

Méthodes

Introduction à la deuxième partie

Ce sont les conditions spécifiques d'expérimentation ainsi que les applications thématiques qui guident le développement et la mise en place de la méthode de mesure du relief immergé de la rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. La revue de la littérature a montré que cette mesure était possible dans le cas de campagnes d'acquisitions photogrammétriques "classiques", c'est à dire avec des plateformes stables, munies de systèmes inertiels, de système de compensation du filé, utilisant des appareils grand format métriques [Westaway et al., 2000, Lane, 2000, Westaway et al., 2001].

L'objectif de cette introduction est d'examiner *a priori* les composantes du problème de mesure de la topographie du lit mouillé de rivière par stéréophotogrammétrie dans le cas de l'utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques. La chaîne reliant l'objet au capteur est décrite de manière analytique afin de préciser les contraintes spécifiques à notre travail.

Le schéma 4.1 représente cette chaîne. On y a retenu les cinq éléments principaux suivants :

1. les caractéristiques des images/du capteur
2. les conditions d'acquisition des images
3. la réfraction à l'interface
4. la traversée de la colonne d'eau
5. les caractéristiques propres de l'objet (ce que l'on cherche à mesurer)

L'utilisation de capteurs et de plates-formes légères, la traversée de l'interface air/eau et de la colonne d'eau apportent en effet non seulement des contraintes très fortes sur la faisabilité de la mesure mais aussi des sources d'erreurs géométriques multiples [Feurer et al., 2007b].

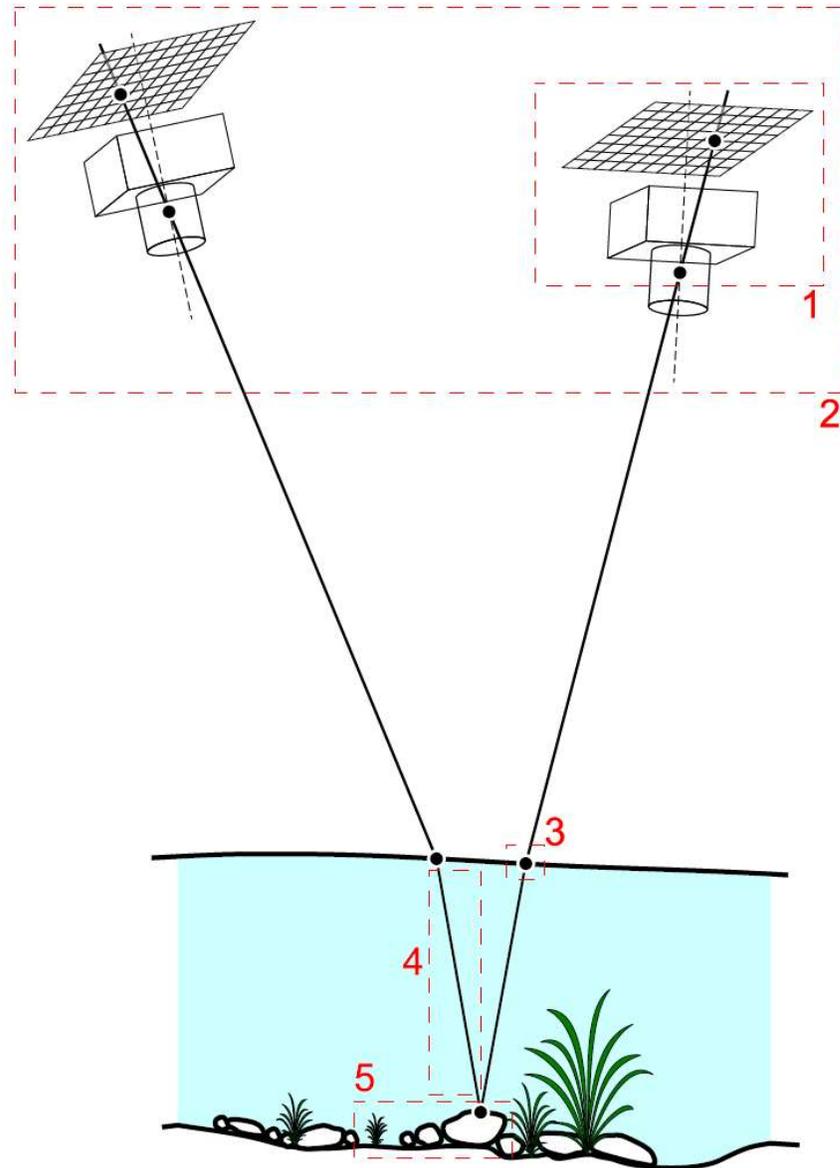


FIG. 4.1 - *Facteurs intervenant dans la mesure de la position d'un objet par stéréophotogrammétrie à travers l'eau : 1 - caractéristiques des images/du capteur ; 2 - conditions d'acquisition des images ; 3 - réfraction à l'interface ; 4 - traversée de la colonne d'eau ; 5 - caractéristiques propres de l'objet.*

La mesure de la géométrie immergée de la rivière est possible à deux conditions : (i) les objets doivent être identifiables dans les images ; (ii) la géométrie d'acquisition doit être connue. Ces deux conditions imposent des critères sur les sites d'applications ainsi que sur les méthodes à utiliser. Les rivières doivent avoir un fond visible (rivières peu profondes et/ou peu turbides) et texturé. La surface de l'eau doit être plane relativement à la profondeur, la taille des objets, l'angle de prise de vue et la résolution des images.

A l'examen de tous ces critères, les rivières régulées (débit constant sur de longues périodes, apports en particules solides de la part des affluents relativement faibles) à fond de graviers (fond clair et texturé) apparaissent comme des terrains d'application *a priori* favorables [Westaway et al., 2001]. Ce sont de plus des rivières qui présentent la problématique d'optimisation des débits réservés (voir section 1.6 et [Balland et al., 2002]).

Dans le cas où la mesure de la topographie immergée est possible, les sources d'erreurs restent nombreuses. Une partie des erreurs possibles est liée à la prise en compte de la traversée de l'interface (point 3) ; les caractéristiques géométriques de cette dernière sont en effet difficiles à mesurer et à connaître. D'autre part, la géométrie de prise de vue externe et interne (points 4 et 5) n'est pas connue dans le cas général et est donc déterminée par calcul. Enfin, dans le cas d'utilisation de drones ou d'ULM, les conditions de prises de vues (taille des pixels, angle de prise de vue - point 4) comportent une variabilité non négligeable, ce qui a des conséquences sur le succès ou l'échec d'appariement des points.

Notre travail est centré sur l'application au milieu spécifique qu'est la rivière. Son objectif n'est donc pas le développement de nouvelles méthodes de calcul de géométrie de prise de vue de clichés ou encore d'algorithmes d'appariement de points. Cependant, la photogrammétrie est au coeur de notre travail et les méthodes que nous avons utilisées seront détaillées (chapitre 5).

L'une des originalités de ce travail réside dans l'utilisation de capteurs et plateformes légères pour l'acquisition d'images exploitables en stéréophotogrammétrie. Les problèmes spécifiques posés par une telle acquisition, dans le milieu spécifique de la rivière, seront exposés dans le chapitre 6.

De plus, notre travail met en oeuvre des techniques de photogrammétrie à deux milieux. Dans le cas particulier de la rivière, ces techniques sont assez peu détaillées dans la littérature et sont traitées dans le chapitre 7.

Enfin, la spécificité du milieu d'intérêt peut être exploitée pour le développement d'une méthode de mesure du relief immergé. L'objet de notre étude est en effet régi par des lois physiques connues : la rivière est le siège d'un écoulement, la géométrie de la rivière obéit donc à certaines contraintes. L'intégration de ces contraintes dans la méthode doit pouvoir permettre de diminuer le bruit sur la mesure dû à la mauvaise connaissance générale de la géométrie de l'acquisition. On détaillera cette approche et la méthode complète de la mesure du relief immergé dans le chapitre 8.

Plan de la Deuxième partie

Introduction à la deuxième partie	60
5 Éléments de photogrammétrie	67
5.1 Cadre théorique	68
5.1.1 Bases théoriques - Vocabulaire	68
5.1.2 Équations de la photogrammétrie	69
5.1.3 Exploitation des équations de la photogrammétrie	71
5.2 Orientation de clichés	73
5.2.1 Orientation interne - étalonnage de l'appareil	74
5.2.2 Orientation externe d'un couple stéréoscopique	75
5.2.3 Compensation en bloc par faisceaux avec autocalibration	76
5.3 Stéréorestitution	77
5.3.1 Appariement par corrélation automatique	78
5.3.2 Restitution manuelle	79
5.3.3 Corrélation supervisée par vision stéréoscopique	80
5.3.4 Intérêt de l'utilisation des deux méthodes avec corrélation numérique	81
5.4 Précision en Z en photogrammétrie numérique	81
6 Acquisition d'images par drone ou ULM	83
6.1 Paramètres imposés et variables à optimiser	83
6.1.1 Cahier des charges pour l'acquisition des images	83
6.1.2 Utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques	84
6.2 Protocole d'acquisition des images	87
6.2.1 Contraintes	87
6.2.2 Choix effectués - réglage du capteur, plan de vol	90
6.2.3 Travail sur le terrain associé	90

6.2.4	Mise en oeuvre opérationnelle du plan de vol	91
6.3	Limites et potentiels	91
6.3.1	Limites	93
	Connaissance de la position du vecteur	93
	Vitesse de la plate-forme	93
	Capteur petit format	93
6.3.2	Potentiels	94
	Coût	94
	Très haute résolution spatiale	94
	Flexibilité des acquisitions	94
7	Que voit-on en stéréo à travers l'eau ?	95
7.1	Cadre théorique	96
7.1.1	Réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux	96
7.1.2	Réfraction et stéréo - notion de point apparent	97
7.1.3	Existence du point apparent	100
7.1.4	Équations de la photogrammétrie à deux milieux	102
7.2	Études préliminaires - présentation de l'approche	103
7.2.1	Résolution d'un cas simplifié	104
	Application numérique et représentation graphique	105
7.2.2	Cas réel : images doubles, occlusions	106
7.2.3	Approche choisie : méthode inverse	107
7.3	Stéréo à travers une surface localement plane	111
7.3.1	Cas d'une surface plane	111
7.3.2	Résultats	113
	7.3.2.a Caractéristiques spatiales	113
	7.3.2.b Influence de la focale	115
	7.3.2.c Influence du B/Z	116
	7.3.2.d Influence du h/Z	116
7.3.3	Bilan	118
7.4	Influence d'une erreur sur la position de la surface	119
7.5	Influence des vagues	122
7.5.1	Approche de modélisation	123
7.5.2	Résultats des simulations	126
	7.5.2.a Visibilité du fond	126
	7.5.2.b Influence des vaguelettes sur la mesure	128

	Faisabilité - Déformation des objets	128
	Erreur sur l'altitude	130
7.6	Discussion et conclusions	131
7.6.1	Effet de la réfraction en stéréo	131
7.6.2	Correction de la réfraction et bruit de mesure	131
7.6.3	Influence des vagues - faisabilité de la mesure	132
7.6.4	Importance de l'altitude de l'interface	133
8	Plan d'eau - contraintes hydrauliques	134
8.1	Cadre - objectif	135
8.1.1	Hypothèses de travail	135
8.1.2	Objectif de l'algorithme	136
8.2	Concepts et notations	137
8.2.1	Minorants et majorants locaux	137
8.2.2	Cohérence, compatibilité, conflits	138
8.2.3	Enveloppes MIN et MAX	139
8.3	Principe et mise en place de l'algorithme	140
8.3.1	Calcul des enveloppes MIN et MAX - régularisation	140
8.3.2	Amélioration de la précision	142
8.4	Implémentation et résultat de l'algorithme	143
8.5	Correction de la réfraction	144
8.5.1	Estimation de la position de la surface de l'eau	144
8.5.2	Estimation de la position réelle du point	145

Chapitre 5

Eléments de photogrammétrie - présentation des méthodes utilisées

La photogrammétrie regroupe un ensemble de techniques visant à effectuer des mesures spatiales à partir d'images. Parmi elles la stéréorestitution correspond au calcul du relief d'une scène à partir de plusieurs images de cette scène prises selon des angles de vue différents. En effet, pour plusieurs images d'une même scène, un même point - immobile - du décor aura une position différente d'une image à l'autre à cause :

- de la différence de position du capteur d'une image à l'autre,
- de la différence de l'angle de visée du capteur d'une image à l'autre,
- de la différence des caractéristiques internes du capteur¹,
- et enfin de la position même de ce point (voir figure 1 dans le chapitre 3).

Il est donc possible, à partir de plusieurs images d'une même scène, dont on connaît la géométrie d'acquisition dans un référentiel lié au terrain, de calculer la position terrain des points de cette scène.

Le cadre théorique des méthodes correspondantes est détaillé dans une première section. On expose ensuite les méthodes de calcul de la géométrie de prise de vue qui ont été utilisées dans ce travail (géométrie interne et externe). Enfin on présentera les techniques d'appariement des points homologues et de calcul de la position terrain utilisées dans ce travail (stéréorestitution).

¹ ceci inclut par exemple les différences de position du négatif, ou encore les déformations dues à l'objectif.

5.1 Cadre théorique - équations de la photogrammétrie

5.1.1 Bases théoriques - Vocabulaire

Une image est une projection en deux dimensions (sur le négatif ou la matrice CCD, par exemple) de l'espace réel à trois dimensions. La modélisation de cette projection a donné lieu à de nombreux travaux.

En vision par ordinateur, ou plus généralement dans le cas d'utilisation de capteurs pour lesquels la distance focale est petite par rapport à la distance entre le capteur et l'objet, on utilise le *modèle sténopé* - l'ensemble des rayons lumineux passe par un seul point, le *centre optique* - pour cette projection [Rabaud, 2005, p.7].

En photogrammétrie, on parlera plus couramment de *géométrie perspective* ou de *projection centrale* [Krauss et Waldhäusl, 1998]. Dans cette géométrie, les trois points, centre optique, point image et point terrain, appartiennent à un même rayon lumineux rectiligne. Cette propriété géométrique, représentée sur la figure 5.1, correspond à la *condition de colinéarité*. La mise en équation de cette condition permet d'obtenir des relations entre coordonnées image et coordonnées terrain [Krauss et Waldhäusl, 1998].

Dès l'établissement de ces bases, ainsi que pour la suite de notre propos, il est nécessaire de définir les termes techniques utilisés dans ce document, provenant de la littérature de la photogrammétrie. La liste des termes et définitions qui suit est tirée et adaptée du lexique topographique de l'Association Française de Topographie [AFT, 2000], de [Krauss et Waldhäusl, 1998], ainsi que d'un article paru dans *The Photogrammetric Record* [Newby, 2007]. Elle est loin d'être exhaustive et est surtout destinée à une meilleure lecture de ce document.

- *géométrie perspective* ou *projection centrale* : modèle de la formation des images utilisé en photogrammétrie et en vision par ordinateur (sous le nom *modèle sténopé*). Selon ce modèle, l'ensemble des rayons lumineux (rectilignes) allant de l'espace objet à l'espace image passe par un point unique, le *centre optique* ;
- *centre optique* (noté O sur la figure 5.1) : point virtuel modélisant comme confondus les centres de projection de l'espace image et de l'espace objet. En toute rigueur ces deux points sont distincts. La notion de centre optique est à la base du *modèle sténopé* présenté ci-dessus. On peut aussi parler de *centre de projection*, ou encore de *centre perspectif* ;

- *point principal d'autocollimation* : projection orthogonale du *centre optique* sur l'espace image. Ce terme peut être trouvé sous la forme abrégée de *point principal* ;
- *distance principale* (notée c sur la figure 5.1) : distance entre le *centre optique* et le plan du capteur - ou du fond de chambre. On utilise aussi le terme de *constante de chambre*, ou encore de *distance focale*, couramment abrégé en *focale* ;
- *géométrie interne* ou encore *paramètres d'orientation interne*, parfois abusivement abrégé en *orientation interne* : ensemble des paramètres caractérisant la façon dont est formée l'image dans le capteur. Ces paramètres incluent en général la *distance focale*, la position du *point principal*, mais aussi les paramètres caractérisant la distorsion due à l'objectif ;
- *couple stéréoscopique* : ensemble de deux photographies prises de deux points de vue différents, présentant une partie commune et permettant le phénomène physiologique de fusionnement (perception du relief par la formation d'une image plastique de la scène en 3D) ;
- *base* : distance séparant les deux *centres optiques* lors de la prise de vue de deux clichés formant un *couple stéréoscopique* ;
- *rapport base sur éloignement*, paramètre caractérisant pour partie la précision de la stéréorestitution. Il est noté dans ce document B/Z afin de conserver la lettre h pour désigner la profondeur de la rivière ;
- *géométrie externe* ou encore *paramètres d'orientation externe*, parfois abusivement abrégé en *orientation externe* : ensemble de 6 paramètres (3 de position, 3 angulaires), caractérisant la position et l'orientation du capteur au moment de l'acquisition d'un cliché ;
- *point de contrôle au sol* ou *GCP* : point connu en planimétrie et/ou en altimétrie - par des relevés sur le terrain - et identifié sur les photographies. L'abréviation *GCP* correspond au terme anglais *ground control point*. On trouve aussi le terme de *point d'appui*, ou *point de calage*. Il peut être matérialisé sur le terrain par des *mires* ;
- les termes *orientation*, *stéréorestitution*, *calibration*, *compensation*, sont définis dans la section 5.1.3

5.1.2 Équations de la photogrammétrie

A partir des bases théoriques exposées dans la section précédente, et en s'appuyant sur les notations reprises dans la figure 5.1, on établit les équations décrivant les relations entre coordonnées-image et coordonnées-terrain de points de la scène.

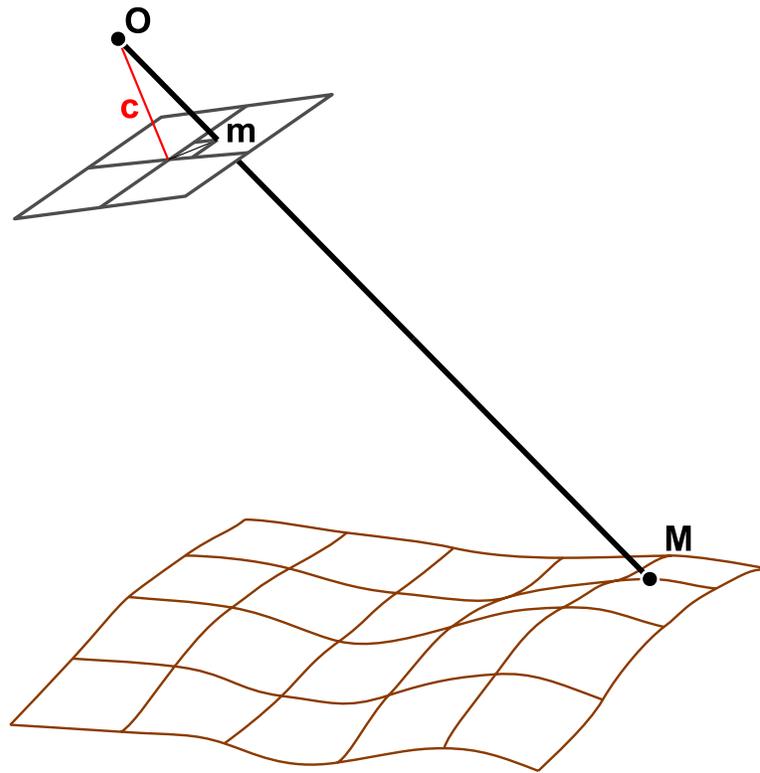


FIG. 5.1 - *Géométrie de prise de vue - Notations*

Si O est le centre de projection, M un point terrain et m un point image, m est l'image de M si et seulement si \overrightarrow{Om} et \overrightarrow{OM} sont colinéaires c'est à dire qu'il existe un réel k tel que $\overrightarrow{Om} = k \cdot \overrightarrow{OM}$. Avec les notations suivantes :

- en coordonnées terrain, $O = (X_0, Y_0, Z_0)$, $M = (X, Y, Z)$ (ce sont les 3 paramètres de position de la géométrie externe)
- en coordonnées capteur, $O = (\xi_0, \eta_0, c)$, $m = (\xi, \eta, 0)$ (c est la distance focale, ξ_0, η_0 et c sont les trois paramètres principaux de la géométrie interne)
- matrice de passage de la base du repère capteur à la base du repère terrain :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Cette matrice est une matrice de rotation dans l'espace, à trois paramètres ω , ϕ et κ , qui sont les trois paramètres angulaires de la géométrie externe (voir figure B.1 en annexe).

La condition de colinéarité, exprimée dans le repère capteur, se traduit finalement par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (5.1)$$

En exprimant la condition de colinéarité dans le repère terrain, on obtient, pour chaque point et chaque image, le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{cases} \quad (5.2)$$

Les étapes du calcul ainsi que l'expression des coefficients de la matrice de rotation figurent en annexe page 241.

Ces équations sont à la base de la plupart des méthodes de photogrammétrie : en effet, selon les données dont on dispose et les paramètres que l'on considère comme inconnus, on pourra effectuer différentes opérations.

5.1.3 Exploitation des équations de la photogrammétrie

L'objectif de cette section est de donner quelques pistes d'utilisation concrète des équations de la photogrammétrie. En effet, on a vu dans la section précédente que celles-

ci permettaient d'effectuer le lien entre coordonnées terrain et coordonnées images. On montre ici quelles applications pratiques sont possibles par le biais d'exemples.

Supposons la géométrie interne (ξ_0, η_0, c) ainsi que la géométrie externe $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ connues, et les 3 coordonnées terrain (X, Y, Z) d'un point inconnues.

En mesurant les coordonnées (ξ_1, η_1) de ce point dans une image, on obtient un système linéaire de 2 équations à 3 inconnues (cf. système 5.2). Pour déterminer un tel système, on a besoin d'au moins une équation supplémentaire. En utilisant une deuxième prise de vue de la même scène, en repérant la position (ξ_2, η_2) du même point dans la deuxième image, et en exprimant la condition de colinéarité pour ce point dans la deuxième image, on obtient 2 équations supplémentaires. On peut alors résoudre le système et déterminer la position (X, Y, Z) du point. Cette opération, impliquant l'appariement des points homologues² (ξ_1, η_1) et (ξ_2, η_2) , s'appelle la *stéréorestitution*.

Supposons que l'on ne connaisse ni la position ni l'angle de visée du capteur au moment de la prise de vue. On a 6 inconnues $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ par image.

Dans ce cas, on utilise des points d'appui, aussi appelés *points de contrôle au sol* ou encore GCPs (pour Ground Control Points). Si l'on mesure leur position au sol (X, Y, Z) , l'expression de la condition de colinéarité pour ces points fournit 2 équations par image et par point. On a donc besoin d'un minimum de 3 points connus en (X, Y, Z) qui soient présent dans chaque image. La résolution du système d'équations permet finalement de déterminer la géométrie externe de prise de vue des images. Le calcul de la géométrie externe à partir de 3 points terrains comme décrit dans ce paragraphe, est appelé *relèvement spatial*. Le calcul des paramètres de la prise de vue (interne et/ou externe) à partir de points de contrôle est appelé en général procédure d'*orientation*.

Supposons que l'on dispose de plus de points de contrôle au sol que nécessaire (système sur-déterminé).

On calcule alors le stéréomodèle s'ajustant au mieux aux différentes mesures. Ceci permet l'amélioration de la précision du calcul en incluant, selon les algorithmes, l'élimination des points faux (mires mal pointées). Il s'agit de méthodes de *compensation*.

²se dit de points image correspondant au même point terrain

Si l'on dispose de suffisamment de points, il est de plus possible d'ajouter aux inconnues du système les paramètres décrivant plus en détail la géométrie interne, notamment la distorsion - ou la distorsion résiduelle non radiale - due à l'objectif. Cela nécessite en contrepartie un nombre suffisant de points connus (dans le système de coordonnées lié au terrain) pour caler les modèles. C'est une des méthodes permettant la *calibration* d'un appareil.

Les sections suivantes s'attachent à décrire les méthodes de détermination de la géométrie d'acquisition utilisées dans notre travail. Enfin, une dernière section sera dédiée aux méthodes de stéréorestitution que nous avons mises en oeuvre.

5.2 Orientation de clichés

Comme mentionné plus haut, l'orientation correspond à la détermination de la géométrie de prise de vue à partir de points image et de points de contrôle au sol. De nombreuses méthodes permettent d'effectuer cette opération. Il est en effet possible par exemple d'effectuer l'orientation en une seule étape (orientation globale) ou alors de séparer le processus d'orientation en plusieurs étapes, comme une orientation relative (une image par rapport à une autre), suivie d'une orientation absolue, en coordonnées terrain. Cette dernière technique fait appel à un système de coordonnées intermédiaires, appelé coordonnées-objet.

L'ensemble de ces méthodes n'est pas décrit ici. On peut pour cela se référer par exemple à [Krauss et Waldhäusl, 1998] ou [Kasser et Egels, 2001]. On se concentrera plutôt sur les méthodes adaptées à notre cas, c'est à dire aux données et aux logiciels disponibles pour notre étude. Du fait de l'utilisation de capteurs légers (caméras non-métriques) il est nécessaire de choisir une approche incluant la modélisation de la géométrie interne et de la distorsion de l'objectif.

Dans un premier temps, on déterminera de manière indépendante les paramètres de la géométrie interne (section 5.2.1) incluant la distorsion de l'objectif. La réalisation de l'étalonnage de la caméra utilisée est primordiale pour les applications pratiques de restitution 3D à partir des mesures effectuées dans les images [Faugeras et Toscani, 1987].

Ces informations seront ensuite utilisées pour la phase d'orientation externe, effectuée couple par couple (section 5.2.2) ou encore en bloc par une compensation par faisceaux (section 5.2.3) avec paramètres additionnels. Cette deuxième méthode permettra de tester la modélisation d'erreurs systématiques éventuelles, dont la distorsion résiduelle de l'objectif.

5.2.1 Orientation interne - étalonnage d'un appareil non-métrique

Avec l'arrivée des capteurs numériques et le développement de la photogrammétrie numérique, mettant à la disposition du plus grand nombre ces outils, les applications en photogrammétrie mettant en oeuvre des capteurs non métriques sont de plus en plus nombreuses [Burnside et Marshall, 1992, Carbonneau et al., 2003, Mills et al., 2003, Chandler et al., 2005]. Afin de pouvoir mettre en oeuvre les techniques développées pour des caméras métriques étalonnées, il est donc nécessaire de passer par une phase de calibration des caméras [Clarke et Fryer, 1998, Chandler, 2001, Short, 1992].

Les bases théoriques de la distorsion, due au décentrement des lentilles par exemple, ont été étudiées de longue date [Brown, 1966, Brown, 1971]. Si l'étalonnage d'une caméra métrique est effectué en général sur un banc optique [Krauss et Waldhäusl, 1998, Clarke et Fryer, 1998], dans le cas d'une caméra non métrique, l'étalonnage peut être réalisé à partir des images, en s'appuyant sur les mêmes principes que ceux utilisés en vision (robotique) [Faugeras et Toscani, 1987, Mei, 2005]. Le principe peut être grossièrement décrit de la manière suivante : on effectue plusieurs prises de vues, selon différents angles, d'un polygone de points dont les positions sont connues avec un biais et une dispersion négligeables devant la taille des pixels des prises de vue. On établit des modèles stéréoscopiques à partir de ces images. On utilise dans un premier temps une valeur initiale pour les paramètres d'orientation interne ξ_0 , η_0 et c . Les modèles stéréoscopiques établis comportent des erreurs systématiques liées à l'imprécision de la valeur initiale des paramètres d'orientation interne. Ces erreurs systématiques se traduisent par des résidus d'ajustement du modèle stéréoscopique sur chacun des points mesurés. On utilise finalement ces résidus pour ajuster un modèle de distorsion et recalculer une valeur plus correcte des paramètres d'orientation interne.

On effectue l'étalonnage de la caméra en modélisant la distorsion par une fonction radiale polynomiale de degré 7 (équation 5.3). On détermine, en plus de la position du point principal et de la focale, les coefficients de ce polynôme ainsi que le centre de symétrie de la distorsion. Celle-ci est ajustée à partir des écarts radiaux et est

imputée à l'objectif dont les lentilles sont supposées co-axiales. Le modèle de distorsion utilisé comporte 5 paramètres : 2 correspondant à la position du centre de distorsion dans l'image et 3 coefficients polynomiaux. La distorsion radiale dr constatée à une distance $r = \sqrt{(\xi - \xi_s)^2 + (\eta - \eta_s)^2}$ du centre de distorsion (ξ_s, η_s) est assimilée à une déformation polynomiale de degré 7 [Rivière, 2003, p. 12] :

$$dr = k_3 r^3 + k_5 r^5 + k_7 r^7 \quad (5.3)$$

La scène constituée des mires de position connue réparties dans plusieurs plans est appelée polygone de calibration. Pour cette étude, c'est le polygone de calibration situé dans le parking souterrain de l'École Nationale Supérieure de Géographie à Marne-la-Vallée qui a été utilisé. Ce polygone est constitué de 50 mires réparties dans 3 plans (voir figure E.1).

L'appareil est réglé de la même manière que lors de l'acquisition sur le terrain, notamment avec la mise au point sur l'infini. On acquiert suffisamment de couples (un minimum de trois en pratique) de manière à ce que les mires soient présentes dans la plus grande partie de l'espace image (notamment dans les coins). Les paramètres du modèle de distorsion radiale et de l'orientation interne sont finalement calculés de manière à minimiser les résidus des modèles stéréoscopiques sur ces points de mesure.

5.2.2 Orientation externe d'un couple stéréoscopique

Il est possible de mettre en oeuvre une approche couple par couple pour calculer les paramètres de l'acquisition, soit les 6 paramètres $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ de chaque image. Dans notre cas, les paramètres d'orientation interne et externe ont été estimés avec les logiciels Etalonnage et Poivilliers E, développés dans un but pédagogique par M. Yves EGELS, professeur à l'ENSG. Le Poivilliers E, ainsi baptisé en hommage au concepteur des stéréorestituteurs analogiques Poivilliers A à D, propose notamment un stéréorestituteur numérique fonctionnant sans configuration matérielle particulière et donc utilisable sur un ordinateur de bureau [Egels, 2000].

Le logiciel intègre des fonctionnalités de calcul de la géométrie de prise de vue avec prise en compte d'un modèle de distorsion radiale pour l'appareil, ainsi qu'un outil d'aide à la saisie par corrélation automatique. Il est accompagné du programme Etalonnage.exe, qui permet de calculer les paramètres d'orientation interne ainsi que de

modéliser la distorsion de l'objectif par un polynôme radial comme décrit plus haut.

Ces informations d'orientation interne et de distorsion de l'objectif sont prises en compte par le biais d'un fichier caméra (voir E.1.2). Le calcul commence par une orientation relative puis, dès que le nombre de points terrain saisis est suffisant, se poursuit par une compensation globale par faisceaux [Egels, 1999] (voir la section 5.2.3 pour la description de l'orientation par faisceaux). Le logiciel inclut de plus une stratégie d'élimination automatique des points faux lors de l'orientation globale.

5.2.3 Compensation en bloc par faisceaux avec autocalibration

On se place dans le cas où l'on dispose de plus de 3 points de calage par image. On a donc un système sur-déterminé et l'on peut effectuer une *compensation* par moindres carrés pour déterminer globalement les paramètres d'orientation externe de chacune des images. Cette technique permet de diminuer l'influence des erreurs aléatoires comme les erreurs de positionnement des points de contrôle - sur le terrain ou dans l'image.

Un des intérêts de cette méthode est la possibilité de l'ajout de paramètres permettant de modéliser les erreurs systématiques résiduelles. De plus, d'un point de vue opérationnel, la compensation en bloc par faisceaux permet de limiter le nombre de points de contrôle au sol et même de constituer un bloc en survolant des zones dépourvues de points de référence terrain.

La compensation en bloc par faisceaux est une technique d'orientation d'un ensemble de clichés. Le terme *bloc* désigne cet ensemble d'images. On s'assure en général du recouvrement des images de telle manière à ce que l'on dispose de points par lesquels passe tout un *faisceau* de rayons lumineux (figure 5.2).

Le plus souvent, on cherche à répartir les images du bloc suivant un quadrillage régulier. On constitue ainsi un ensemble d'images comportant un recouvrement longitudinal d'environ 60% (images successives d'une même bande) et un recouvrement latéral d'environ 20% (entre deux bandes d'images). Ceci permet d'avoir jusqu'à 6 points image pour un seul point sol (un même point sol peut en effet apparaître dans trois images successives, et ce, pour deux bandes d'images parallèles). On assure ainsi la cohérence entre les images du bloc et on limite le nombre de points terrain nécessaires. La méthode de compensation par faisceaux établit directement la relation entre les coor-

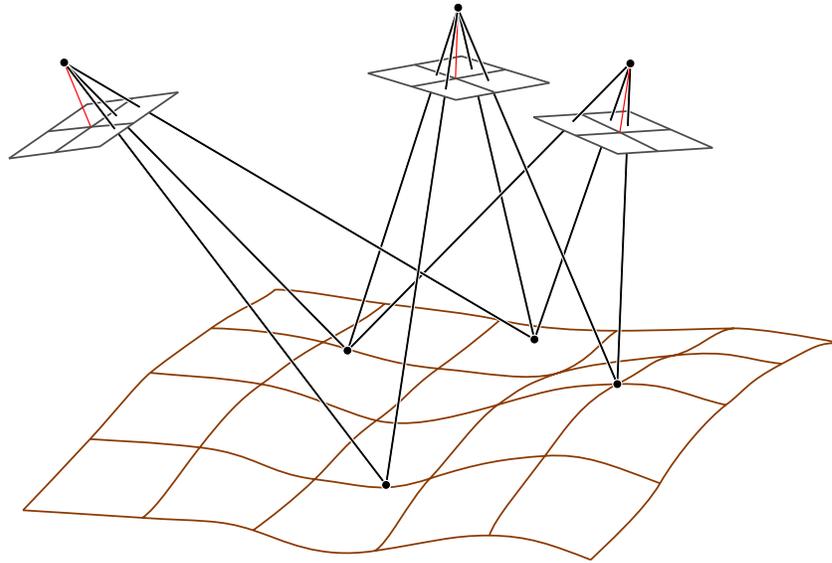


FIG. 5.2 - 4 faisceaux comportant 2 ou 3 rayons

données image et les coordonnées terrain.

En revanche, dans le cas de l'ajustement de paramètres supplémentaires, le modèle a un plus grand nombre de degrés de liberté. Un plus grand nombre de points est donc nécessaire pour s'assurer de la convergence du calcul. La bonne estimation de ces paramètres assurera la réduction des erreurs systématiques. Ces erreurs systématiques sont dues pour partie à la distorsion de l'objectif ou de manière générale à une mauvaise connaissance de la géométrie interne. La modélisation de ces distorsions par cette approche s'appelle l'*autocalibration*. Cette méthode est très utile lorsqu'on utilise des appareils non métriques [Krauss et Waldhäusl, 1998, p. 283].

5.3 Stéréorestitution

Comme on l'a vu dans la section 5.1.3, la stéréorestitution correspond au calcul de la position (X, Y, Z) des points terrain à partir de leur position dans deux images au moins dont la géométrie de prise de vue est connue. Un des problèmes principaux de la stéréorestitution réside donc dans l'identification de points homologues, images d'un même objet de la scène. On utilise donc pour cela des méthodes d'appariement de points.

5.3.1 Appariement par corrélation automatique

L'utilisation d'images numériques en photogrammétrie a permis le développement de nouvelles solutions pour la restitution du relief. Ainsi la formation de modèles numériques de terrain intègre couramment la corrélation automatique des images. Une telle méthode présente plusieurs avantages : rapidité du calcul (et donc possibilité d'une grande densité de mesures), reproductibilité du calcul et enfin précision. La corrélation automatique peut en revanche souffrir d'un manque de fiabilité, notamment sur les zones présentant des textures périodiques, des radiométries faibles (ombres) ou encore sur des zones où la projection de la scène dans l'espace image amène des discontinuités (occlusions dans les zones à fort relief).

En effet le problème d'appariement de points fait partie de la famille des problèmes mathématiques mal posés : l'existence et l'unicité de leur solution n'est pas garantie, du fait de la perte d'information par projection de l'espace objet 3D dans l'espace image 2D. En pratique, pour résoudre ce problème, on a recours à plusieurs solutions. On effectue notamment une corrélation qui s'appuie sur un voisinage. On peut aussi imposer des contraintes de régularité aux solutions. Il découle de ces deux stratégies une possibilité non négligeable de fausses corrélations, si les critères de ressemblance au voisinage du point et/ou de régularité de la solution sont satisfaits. Le traitement des cas de fausse corrélation pose donc un nouveau problème. Les critères de ressemblance (coefficient de corrélation) ou de régularité seuls ne sont pas totalement discriminants. Par exemple, deux objets physiquement différents mais radiométriquement localement très semblables peuvent avoir un coefficient de corrélation très élevé conduisant à la détermination de solutions erronées.

Il s'agit de la fonctionnalité proposée par les logiciels de photogrammétrie du commerce. Dans notre cas, le bloc d'image a été traité avec la suite photogramétrique de Leica notamment le module LPS. Ce module utilise différents outils pour le calcul de corrélation : une détection et un appariement de points d'intérêts, ainsi qu'un calcul de corrélation de fenêtre, exploitant la géométrie épipolaire dans les multiples échelles d'une pyramide d'images [Leica, 2003, p.69-73]. En revanche, la documentation fournie avec le logiciel ne donne pas suffisamment de détails pour savoir si les calculs de corrélation se font dans une géométrie épipolaire ré-échantillonnée, ou encore si la corrélation inclut une corrélation de formes ou d'objets. La nature et la signification des paramètres dont la valeur peut être modifiée par l'utilisateur laisse supposer qu'il s'agit d'une corrélation de surface.

5.3.2 Restitution manuelle

Il existe une autre méthode, celle qui était utilisée initialement en photogrammétrie analogique : la stéréorestitution effectuée par un opérateur. Il s'agit de méthodes de restitution où les positions image sont mesurées de manière manuelle, par le biais par exemple de comparateurs ou de stéréorestituteurs analogiques. On détaille ici l'utilisation des stéréorestituteurs analogiques ou analytiques, car le stéréorestituteur numérique utilisé pour ce travail est basé sur les mêmes principes. On forme, pour chaque œil, une image d'un cliché (respectivement le gauche et le droit). Les clichés sont orientés de manière à annuler les parallaxes. Dans le cas idéal, seule subsiste la parallaxe suivant l'axe de vol. Cette parallaxe est orientée suivant l'axe passant par les yeux de l'opérateur pour assurer l'effet stéréoscopique. L'opérateur perçoit donc une surface tridimensionnelle appelée stéréomodèle ou modèle plastique.

On fournit par ailleurs à chaque œil l'image d'un objet, *l'index de pointé* aussi appelé *ballonnet*. L'ajustement tridimensionnel en chaque point de la position du ballonnet à la surface du modèle stéréoscopique permet de déterminer la parallaxe en ce point et donc les coordonnées terrain et notamment l'altitude de ce point.

L'utilisation de telles méthodes permet de diminuer le risque de faux appariement de points en faisant appel au contrôle externe et à l'expertise humaine³. En revanche, on est limité par la saisie manuelle et les fortes densités de points mesurés s'obtiennent au prix d'heures de main d'oeuvre. D'un autre côté, la perception du relief par effet stéréoscopique permet des opérations différentes, du fait de la photointerprétation. Elle est par exemple utilisée de manière opérationnelle pour la restitution de courbes de niveau.

Pour résumer, cette méthode est fastidieuse, mais fiable et opérationnelle. Cette technique n'a pas été utilisée dans notre travail. La description de son principe et l'introduction du vocabulaire associé est cependant intéressante pour les explications développées dans la section suivante.

³ce risque subsiste néanmoins dans les zones très homogènes des images, où l'image plastique des objets photographiés est plus difficilement perceptible

5.3.3 Corrélation supervisée par vision stéréoscopique

Il est en effet possible d'effectuer la stéréorestitution de manière mixte, par un opérateur assisté d'un outil de corrélation automatique. On peut espérer de cette manière tirer parti à la fois de (i) la fiabilité de la mesure, et (ii) de la précision, rapidité et reproductibilité du calcul de corrélation pour le pointage. La densité de restitution peut être dans ce cas optimisée selon les zones de la scène observée. Cette méthode peut être mise en oeuvre avec le logiciel Poivilliers E, où le processus de restitution est là aussi basé sur l'effet stéréoscopique et l'utilisation d'un ballonnet - ou index de pointé - numérique cette fois [Egels, 2000].

En pratique, le logiciel affiche alternativement les images gauche et droite d'un couple avec une fréquence suffisamment élevée pour que le scintillement soit invisible à l'œil nu. Un signal de synchronisation sort sur le port parallèle. En synchronisant par exemple l'obturation d'une paire de lunettes à cristaux liquides à cette sortie, on fournit une image différente à chaque œil et on obtient l'impression de relief. L'opérateur positionne ensuite le ballonnet sur la surface du modèle de manière à effectuer la restitution de l'altitude du point courant.

La différence avec une stéréorestitution intégralement manuelle est la suivante : le format numérique des images permet d'utiliser un outil de corrélation automatique. Le protocole peut alors être le suivant : l'opérateur positionne tout d'abord le ballonnet à proximité d'un point de la surface virtuelle. On lance ensuite un calcul de corrélation qui détermine l'altitude du ballonnet pour laquelle le coefficient de corrélation est maximum à la position (X, Y) courante. L'opérateur choisit ensuite de valider ou non le point corrélé selon sa sensation visuelle d'attachement du ballonnet au stéréomodèle.

Une bonne partie des fausses corrélations, c'est à dire, une nouvelle fois, les cas de forte corrélation entre deux points image correspondant à deux points terrain différents, est ainsi éliminée. On profite de plus de la précision du calcul subpixelaire du corrélateur numérique.

5.3.4 Intérêt de l'utilisation des deux méthodes avec corrélation numérique

L'objectif de ce travail n'étant pas de développer de nouvelles techniques de corrélation, les deux techniques présentées ci-dessus (la corrélation automatique et la corrélation supervisée par vision stéréoscopique) ont été utilisées telles quelles. La méthode de corrélation automatique avec un logiciel du commerce a été utilisée tout d'abord pour donner une idée de la densité de mesure que l'on peut obtenir dans un cadre opérationnel. En revanche, on manque de données dans ce cas pour évaluer l'influence de la corrélation sur la qualité de la restitution. La donnée seule du coefficient de corrélation ne permet en effet pas de déterminer a priori si l'appariement est exact ou non.

Ensuite, dans le cadre du développement puis de l'évaluation de la méthode de calcul du relief immergé avec correction de la réfraction, c'est la stéréorestitution avec calcul de corrélation supervisé par un opérateur qui a été mise en oeuvre. Cette technique a deux intérêts : (i) on diminue le biais de mesure dû aux fausses corrélations ; (ii) on peut adapter l'effort de restitution en l'accentuant sur les zones présentant les plus forts gradients et/ou sur les zones où la densité de points mesurés par corrélation automatique de surface sera la plus faible. Celle-ci peut en effet être difficile selon les conditions expérimentales (turbidité, masquage du fond par des reflets). Ce seront donc principalement les mesures issues de stéréorestitution assistée qui serviront à *évaluer le potentiel de la méthode* en conditions réelles.

5.4 Précision de la mesure du relief en photogrammétrie numérique

Il est possible de trouver un développement de la théorie des erreurs de stéréorestitution dans des cas simplifiés. [Krauss et Waldhäusl, 1998] se situent dans le cas normal (visée verticale pour chaque cliché), avec l'hypothèse supplémentaire qu'il n'y a pas d'erreur sur la focale (élément de l'orientation interne) ni sur la base (issue de l'orientation externe). En effet, dans ce cas, les équations se simplifient et aboutissent à la formule suivante pour le calcul de la précision σ_Z de la mesure en Z :

$$\sigma_z = \frac{Z}{c} \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi} \quad (5.4)$$

où Z est la hauteur de vol, c la focale en pixels, B la base et σ_{p_ξ} la précision d'appariement des points ou précision de pointé (écart-type de la parallaxe mesurée). Cette

formule, exacte dans le cas normal (visées verticales) permet de donner une idée d'un ordre de grandeur pour le cas général.

Cette formule fait intervenir trois facteurs : (i) le rapport Z/c correspond au *facteur d'échelle*, noté m_b par [Krauss et Waldhäusl, 1998]; (ii) le rapport B/Z , en français *rapport base sur éloignement*; (iii) la précision de détermination de la parallaxe.

En pratique, la meilleure précision sera obtenue pour la résolution au sol la plus fine, avec un rapport base sur éloignement élevé, et une bonne précision de détermination des points homologues.

Dans le cas du calcul de la parallaxe par corrélation automatique, on peut s'intéresser à la précision intrinsèque de corrélation. [Kasser et Egels, 2001] évaluent cette précision. Plusieurs cas idéaux sont simulés, pour lesquels les points homologues sont superposables par de simples translations. L'erreur systématique est étudiée pour différentes valeurs de la partie fractionnaire de la translation (de 0 à 1 pixel). Avec différentes fonctions d'interpolation utilisées pour la corrélation, un biais maximal de 0.25 pixel est constaté : la précision de corrélation subpixellaire est donc considérée comme étant d'un quart de pixel.