

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des sciences
Sciences géographiques



**Evaluation de la Direct-Linear Transformation (DLT) pour la
restitution tridimensionnelle d'un modèle réduit d'une retenue
d'eau et considérations dynamiques pour sa rupture par surverse.**

Promoteur : **Y. CORNET**

Co-promoteur : **B. DEWALS**

Lecteurs : **P. ARCHAMBEAU** et **G. HOUBRECHTS**

Mémoire présenté par :
Grégoire LIENART
Pour l'obtention du titre de :
Master en sciences géographiques :
Orientation géomatique et géométrie

Année académique :
2014-2015

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mon promoteur Yves Cornet, mon co-promoteur Benjamin Dewals ainsi qu’à Pierre Archambeau qui jamais n’ont été avarés de conseils ou d’explications lorsque je les ai sollicités.

Je remercie Ismail qui s’est improvisé assistant-géomètre avec brio le jour de la rupture de la digue ainsi que Benoît et Gilles pour les quelques conseils techniques prodigués afin de maîtriser parfaitement le tachéomètre.

Je remercie mes colocataires, Christophe et Laetitia pour leur soutien au quotidien ainsi que l’ensemble des Masters 2 géomatique et géométrie pour leurs conseils avisés et leur imperturbable bonne humeur.

Enfin, je ne pourrais pas remercier assez ma famille, mes proches et surtout mes parents qui ont toujours été bienveillants et encourageants. J’espère qu’ils estiment que « la flèche » a pris une bonne direction.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	2
Table des figures.....	6
Partie I – Eléments introductifs	8
1. Introduction.....	8
2. Etat de l’art.....	10
3. Hypothèse et environnement de travail.....	15
3.1. Hypothèses de travail.....	15
3.2. Limitations du travail.....	15
3.3. Environnement de travail.....	16
3.3.1. Un modèle réduit de retenue d’eau.....	16
3.3.2. Un ensemble d’appareils de mesures	17
3.3.3. Un outil informatique d’implémentation	19
Partie II - Développements théoriques et validations	20
4. Introduction.....	20
5. Théorie de la DLT à 11 paramètres	20
5.1. Formulation des équations fondamentales.....	20
5.2. Formulation des équations de calibration.....	26
5.2.1. Formulation du système.....	26
5.2.2. Résolution du système	27
5.2.3. Qualité de la calibration.....	28
5.2.4. Obtention de grandeurs physiques.....	28
5.3. Formulation des équations de restitution	29
5.4. Conseils d’ordre pratique	31
6. DLT à 11 paramètres – validation par une application	31
6.1. Introduction	31
6.2. Protocole d’acquisition.....	33
6.2.1. Distribution spatiale des PC et PV.....	33
6.2.2. Détermination des coordonnées-mondes.....	34
6.2.3. Acquisition des images.....	34
6.2.4. Détermination des coordonnées-images (digitalisation)	38
6.3. Calibration des clichés	40
6.4. Restitution de la scène	45
6.5. Enseignement de l’application de la DLT à 11 paramètres	48
7. Théorie de la DLT à 16 paramètres	49
7.1. Intégration de la modélisation des distorsions optiques	49
7.2. Formulation des équations de calibration.....	51
7.3. Formulation des équations de restitution	53
8. DLT à 16 paramètres – validation par une application	54
8.1. Introduction	54

8.2. Calibration des clichés	54
8.2.1. Implémentation du programme de calibration	54
8.2.2. Résultats et analyses	60
8.3. Restitution de la scène	70
8.3.1. Implémentation du programme de restitution	70
8.3.2. Résultats et analyses	73
9. Enseignements	75
9.1. Résumé et enseignements de la calibration	75
9.2. Résumé et enseignements de la restitution	77
Partie III – Application de la DLT à modèle réduit de retenue d’eau	78
10. Introduction et présentation de l’objet d’étude	78
10.1. Introduction	78
10.2. Objet d’étude	79
11. protocole	80
11.1. Distribution des PC et des PV	80
11.2. Détermination des coordonnées-mondes des points de calibration et de vérification (utilisation d’un tachéomètre)	81
11.2.1. Concepts généraux	81
11.2.2. Concept d’erreur	83
11.2.3. Changement de référentiel	85
11.2.4. Campagne de levé	86
11.2.5. Traitement des données et résultats	88
11.3. Acquisition des images	90
11.4. Détermination des coordonnées-images (digitalisation)	92
12. Calibration des clichés	93
12.1. Introduction	93
12.2. Résultats et analyses	93
12.2.1. Temps initial	93
12.2.2. Temps final	96
12.2.3. Temps final + temps initial	96
13. Restitution de la scène	97
13.1. Introduction	97
13.2. Résultats et analyses	97
13.2.1. Temps initial	97
13.2.2. Temps final	98
13.2.3. Temps initial + temps final	99
14. Enseignements de l’application au modèle réduit de retenue d’eau	104
15. Recommandations pour la dynamique.	105
Partie IV – Conclusions et perspectives	107
16. Conclusions	107
17. Perspectives	108
Bibliographie	110

Annexes numériques114

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Modèle réduit de la retenue d'eau.....	16
Figure 2 - Coupe longitudinale de la retenue d'eau.....	17
Figure 3 –Appareils photographiques grand-public employés.....	17
Figure 4 - Tachéomètre LEICA.....	19
Figure 5 - Modèle de caméra à trou d'épingle.	21
Figure 6 - Négatif et positif (reprojection).....	21
Figure 7 - Définition du référentiel-image et du référentiel-monde.....	22
Figure 8 - Expression du centre de projection dans le référentiel-monde.	22
Figure 9 - Point principal et distance principale.	22
Figure 10 - Diagramme récapitulatif de la DLT.....	26
Figure 11 - Représentation d'une restitution.	29
Figure 12 - Eléments indispensables à l'application de la théorie.....	31
Figure 13 - Objet d'étude, maquette Lego.	32
Figure 14 - Démarche générale de validation de la DLT.	33
Figure 15 - Distribution des PC (rouge) et PV (vert) sur la scène.....	34
Figure 16 - Dimensions des blocs Lego.....	34
Figure 17 - Géométrie d'une prise de vue (triangles semblables).....	35
Figure 18 - Prises de vue de la maquette Lego.....	37
Figure 19 - Positions des prises de vues et gerbes de rayons perspectifs.....	38
Figure 20 - Schématisation d'une image et de son référentiel.	38
Figure 21 - Cible idéale.	39
Figure 22 - Résidus en u et en v de la calibration (LegoL)	43
Figure 23 - RGC (pixels) par PC, classés selon leur écart par rapport au centre de l'image (LegoL)	44
Figure 24 - RGR par PV (en mm) - configuration L +C +R).....	48
Figure 25 - Distorsion radiale et tangentielle	49
Figure 26 - Géométrie d'une image et distorsions (inspiré de Chen, 1994).....	49
Figure 27 - Matrice à n dimensions	56
Figure 28 - Evolution de l'indice de convergence (LegoL).....	61

Figure 29 - Evolution du RMSE (pixels) (LegoL)	62
Figure 30 - RGC (pixels) par PC, LegoL	63
Figure 31 - Distributions des résidus en u et en v pour les PC, legoL.....	64
Figure 32 - Comparaison de la complexité de la modélisation des distorsions optiques.....	65
Figure 33 - Configuration coplanaire des PC, LegoL	66
Figure 34 - Evolution de l'indice de convergence (configuration coplanaire), LegoL.....	66
Figure 35 - Evolution de l'indice de convergence (à gauche) et de la RMSE (à droite) en fonction des itérations.....	67
Figure 36 - RGC (en pixels) par PC, legoC	68
Figure 37 - Evolution de l'indice de convergence (à gauche) et de la RMSE (à droite) en fonction des itérations.....	69
Figure 38 - RGR (en mm) par PV (comparaison 11p – 16p).....	74
Figure 39 - Comparaison de la calibration avec et sans modélisation des distorsions optiques pour chaque prise de vue.....	76
Figure 40 - Maquette de la retenue d'eau.....	79
Figure 41 - Distribution spatiale des PC (rouge) et PV (vert) (temps initial).....	80
Figure 42 - Distribution des PC (rouge) et PV (vert) au temps final.....	81
Figure 43 - Anatomie d'un tachéomètre	82
Figure 44 - Changement de référentiel.....	85
Figure 45 - Tachéomètre, mini-prisme, cible autocollante, embase.....	86
Figure 46 - Plan de situation, temps initial.	89
Figure 47 - Plan de situation, temps final.	89
Figure 48 - Les quatre clichés au temps initial.....	91
Figure 49 - Les quatre clichés au temps final.....	92
Figure 50 – Evolution de l'indice de convergence - Canon 50d - temps initial.....	93
Figure 51 - RGC (en pixels) par PC avec et sans prise en compte des	94
Figure 52 - Déploiement des distorsions optiques, kodak, temps initial.....	95

PARTIE I – ELEMENTS INTRODUCTIFS

1. INTRODUCTION

Les digues sont des ouvrages largement répandus pour la protection des biens et des populations. Cependant, leur vieillissement ainsi que les sollicitations subies lors d’évènements hydrauliques extrêmes peuvent conduire à la formation de brèches et à la rupture de la retenue d’eau. Du point de vue de la gestion des risques, il est crucial d’étudier et de comprendre les processus de formation de brèche (Dewals et al., 2014).

Vu l’extrême difficulté et la dangerosité d’effectuer des mesures détaillées au cours d’évènements réels, l’étude de ces processus se fait presque exclusivement par modélisations physiques et par modélisations numériques. La combinaison des deux types de modélisation est l’approche la plus efficace pour l’analyse et la compréhension de tels phénomènes (Ercicun et al., 2009). Cependant, la validation et la calibration des modèles numériques sont rendues difficiles par l’absence ou la faible fiabilité des données issues des modèles physiques (Mohamed, 2002).

Les principales mesures effectuées sur le modèle physiques sont la hauteur d’eau sur les parties amont et aval du talus, des mesures de pression à certains endroits ponctuels, la mesure de la vitesse de l’eau juste avant qu’elle ne passe la brèche, les propriétés du sol, la mesure de la section de la brèche après expérience ou encore la croissance de celle-ci durant l’expérience via l’analyse de photographies (Morris et Hassan, 2007). Dans le domaine de l’analyse de photographies ou de vidéos, domaine sur lequel porte particulièrement notre intérêt, certains chercheurs filment le talus de profil, confiné dans un canal transparent, au cours de l’expérience (Schmocker et Hager, 2009).

Le laboratoire HECE (Hydraulics in Environmental and Civil Engineering) de l’Université de Liège dispose de tels modèles physiques et de matériel (appareils photographiques grand public) pour extraire de l’information utile à la validation de leurs modèles numériques. Cependant, un surplus de données spatiales et temporelles fiables serait le bienvenu. C’est dans ce cadre que s’inscrit ce projet d’étude avec, comme question de recherche :

Quelle méthode, simple à reproduire, permettrait d’obtenir un modèle numérique dynamique de surface représentant l’évolution de la rupture d’un ouvrage hydraulique (maquette), à la précision de l’ordre de la taille des éléments constitutifs du barrage et, en utilisant comme outils d’acquisition, des caméras grand public ?

Suite à un état de l’art présentant non seulement les techniques de modélisation physique de maquette de retenue d’eau mais aussi de certaines pratiques du domaine de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur, une hypothèse de réponse à la question de recherche sera formulée.

Cette proposition de réponse impliquant certaines considérations théoriques à propos de la Direct Linear Transformation, un large chapitre y sera consacré. L’élaboration théorique, progressivement complexifiée sera implémentée dans le logiciel MATLAB. En plus de ces scripts MATLAB, véritables transpositions techniques et pratiques de la théorie, un protocole d’acquisition de données sera imaginé. L’implémentation progressive sera systématiquement validée par une application sur une maquette en blocs « Lego ». Lorsque les algorithmes et le protocole d’acquisition de données seront jugés suffisamment mûrs et efficaces, ils seront appliqués à l’objet d’intérêt : le modèle réduit de retenue d’eau.

Enfin, certaines considérations, si l’expérience se voulait dynamique seront apportées.

2. ETAT DE L’ART

Historiquement, les barrages sont construits pour répondre à deux besoins des sociétés humaines: l’approvisionnement en eau et l’irrigation. Avec le développement des civilisations, d’autres raisons se sont progressivement ajoutées aux deux précédentes : le contrôle des crues, le contrôle des sédiments, la navigation, la protection des populations ,... (CIGB). Les barrages peuvent prendre différentes formes dont les plus connues sont les barrages-voûtes, les barrages-poids, les barrages à contreforts et les digues.

L’eau s’écoule à travers un ouvrage hydraulique, à travers ses fondations et ses appuis (Bonelli, 2001). Dans certains cas exceptionnels, elle peut s’écouler par surverse au-dessus de l’ouvrage, lors d’une crue par exemple. Bonelli (2001), définit ce phénomène de surverse comme étant « un écoulement transitoire à surface libre sur la crête et le talus aval de l’ouvrage ». Il ajoute que « la vitesse d’écoulement et la contrainte de cisaillement fluide, qui détache et transporte des grains dans le cas d’un sol non cohésifs, ou des mottes dans le cas d’un sol cohésif sont les grandeurs qui pilotent le phénomène ». Les ouvrages hydrauliques de remblais, barrage ou retenue d’eau ne sont généralement pas aptes à supporter un écoulement important de surverse (Courivaud). Cependant, la compréhension actuelle des mécanismes de ruptures de digues reste encore parcellaire, d’autant que les ruptures de digues impliquent des interactions complexes entre les écoulements, les matériaux constituant l’ouvrage ainsi que le sol et les fondations (Dewals et al., 2014).

Etudier la topographie de l’ouvrage au cours de la rupture permettrait, parmi d’autres recherches, d’améliorer la compréhension de tels phénomènes. Cette étude fera l’objet de ce mémoire en mettant au point une technique d’extraction de la topographie des ouvrages hydrauliques.

Plusieurs techniques d’acquisition d’informations topographiques ont été développées au cours des temps. Rifai et al., (2015) ont détecté plusieurs techniques issues de divers domaines scientifiques : la projection de franges sur le corps de l’ouvrage (Pickert et al., 2011), l’utilisation de lasers pour balayer la partie aval de la digue (Spinewine, 2004) ou encore l’utilisation de la photogrammétrie pour restituer la scène(Schmocker et Hager, 2009).

Ces deux dernières techniques, liées à la géomatique et la géométrie seront particulièrement développées.

Lasergrammétrie terrestre.

Le balayage laser se définit comme une technique utilisant la lumière laser pour mesurer directement, selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points d’une des surfaces depuis une position terrestre (Pfeifer, 2007). Une classification des scanners peut être effectuée sur base de la technique de mesure de distance intégrée à l’appareil. On distingue les scanners à impulsions, à mesure de différence de phase et à triangulation dont les principes, caractéristiques et gammes de précision sont reportés dans le *tableau 1* suivant.

Tableau 1 - comparaison des lasers terrestres

	Laser à impulsions	Laser à différence de phase	Laser à triangulation

Principe	Mesure le temps de parcours via une horloge très précise	Mesure le temps via une différence de phase	Mesure de distance via la résolution de triangles
Caractéristiques	- Usage à longue portée uniquement - 350 000 points/sec	- Usage à courte et moyenne portée uniquement - 1 000 000 points/s	- Usage à courte portée
Gamme de précision	3 à 4 mm à 100m 3 à 20 mm à 50m	3 à 7 mm à 50m	-

Source : (Landes et al., 2011)

Cette technique est particulièrement intéressante et efficace dans des acquisitions de scènes statiques. Elle ne se prête pas à la modélisation de phénomènes dynamiques comme la rupture d’une retenue d’eau. Cette solution est donc écartée bien qu’elle puisse être utilisée au temps initial et au temps final de l’expérience.

Techniques photogrammétriques

Initié à cette discipline au cours mon cursus universitaire, la photogrammétrie, « qui permet de définir la forme et les dimensions d’un objet à partir de photographies sans les toucher » (Kraus et Waldhäusl, 1997) semble être une réponse séduisante au problème posé.

La démarche photogrammétrique est composée de différentes étapes ou orientations (Cornet, 2014) :

- L’orientation interne qui vise à reconstruire la gerbe perspective telle qu’elle existait lors de la prise de vue, avant d’entrer dans le système d’acquisition et donc exempte de tout défaut.
- L’orientation relative qui vise à déterminer relativement les positions et les orientations des points de vue dans un système cohérent.
- L’orientation absolue qui permet de replacer les objets restitués dans un système de référence choisi.

La photogrammétrie est entachée de contraintes très restrictives en pratique, notamment lors de l’orientation interne. En effet, la nécessité de connaître les paramètres internes des appareils photos (distorsion de l’objectif, focale, position du point principal), oblige l’utilisation de caméras métriques, fragiles, peu disponibles et extrêmement onéreuses (Zeroual et Liazid, 2006). Généralement, les caméras métriques ont une orientation interne stable, référencée par l’intermédiaire de marques fiduciaires dont les paramètres internes demeurent constants et sont renseignés dans des certificats de calibration (Karara et Faig, 1980).

Dès lors, pour palier à cet obstacle, mes recherches se sont portées sur des méthodes de calibration d’appareils photographiques « grand public ». La calibration est une tâche importante pour assurer une précision suffisante dans la restitution d’objet 3D. Elle implique de déterminer la position du point principal, les facteurs d’échelle selon les axes verticaux et horizontaux de l’image, les distorsions de l’objectif (Orteu, 2009).

Globalement, il existe deux axes principaux pour calibrer des caméras. La calibration ex-situ et la calibration in-situ.

- La calibration ex situ. Le modèle de calibration est déterminé en photographiant une grille de référence 2D ou 3D en amont des prises de clichés utilisés pour la restitution.
- La calibration in situ. La calibration des points de vue est effectuée directement sur le terrain en même temps que la prise des clichés utilisés pour la restitution. On qualifie cette calibration d’auto-calibration. A l’issue de celle-ci, sont obtenues non seulement l’orientation interne mais aussi les orientations relatives et absolues.

Pour des raisons pratiques évidentes, la calibration in situ sera préférée pour ce travail.

En outre, le principe fondamental de restitution lié à la photogrammétrie est la triangulation. L’étape indispensable à l’application de ce principe est la connaissance des positions et des orientations des prises de vue. Théoriquement, il suffit de trouver l’intersection des deux rayons issus de leur centre de projection et pointant vers le point à restituer mais en pratique, en présence de bruit, ces rayons ne se coupent plus. Il faut donc trouver "la moins mauvaise des solutions" à ce problème (Eudes, 2011). Elle se détermine souvent en procédant à un ajustement des faisceaux par blocs sur base d’un nombre minimum de points homologues aux différents clichés.

En hydraulique, les méthodes d’acquisition photogrammétrique ont déjà été utilisées mais se servent systématiquement, de logiciels de photogrammétrie propriétaires et payants auxquels nous n’avons pas accès dans le cadre de ce mémoire. Ces logiciels sont nombreux sur le marché, on peut citer par exemple :

- Photomodeler (“Photomodeler”);
- Agisoft Photoscan (“Agisoft PhotoScan”);
- Micmac, Apero et Pastis, outils open-sources performants développés par l’Institut Géographique National français (IGN). La limite à l’utilisation de ce logiciel est la grande complexité du paramétrage et le peu de documentation à l’heure actuelle (“Micmac, Apero, Pastis”). Cette suite de logiciels mériterait cependant une attention particulière.

En marge de ces techniques classiques de photogrammétrie, existe une méthode fort intéressante pour le cadre de ce mémoire : la Direct Linear Transformation.

La méthode Direct Linear Transformation (DLT) (Aziz et Karara, 1971) est apparue être un choix judicieux car très souple à mettre en œuvre, intégrant une auto-calibration et assurant un bon rapport qualité/prix (Zeroual et Liazid, 2006). La DLT est une méthode de photogrammétrie terrestre qui permet à partir de 2 clichés issus d’appareils photographiques «grand public» et de 6 points de calibration minimum, de déterminer les coordonnées tridimensionnelles de l’ensemble des points communs aux deux clichés (Laplanche et al., 2008). Comparé à la méthode classique de photogrammétrie, les orientations intérieures, relatives et absolues ainsi que la restitution sont effectuées en deux étapes :

- La première étape est la calibration de l’ensemble des clichés pris séparément à l’aide d’une série de paramètres (de 11 à 16). Ceux-ci décrivent la relation entre des points de coordonnées connues sur le terrain et les points correspondants dans les différents clichés en intégrant ou non certains paramètres internes des appareils d’acquisition.
- La deuxième étape consiste à reconstituer la position tridimensionnelle des objets en utilisant les paramètres issus de la calibration ainsi que la position de ces objets sur les différentes images. Si on désire augmenter le degré de fiabilité des résultats, on peut augmenter le nombre de clichés ou le nombre de points d’appui. La surabondance des

résultats permet de résoudre les systèmes d’équation par la méthode des moindres carrés.

En outre, certaines études démontrent que l’utilisation de la DLT se prête aussi à des études dynamiques (Lee et Faig, 1999; Shapiro, 1978), c’est à dire avec des appareils vidéographiques plutôt qu’avec des appareils photographiques.

Ernst (2006) et Laplanche et al. (2008) ont étudié la théorie de la DLT dans le cadre de restitution de fragments urbains. Ils ont détecté certains avantages à l’utilisation de cette méthode photogrammétrique :

- La longueur focale est une inconnue ;
- Le système de coordonnées image est arbitraire ;
- La position du point principal de l’image est inconnue ;
- Une modélisation des distorsions optiques peut être intégrée à la démarche.

Ces grands avantages permettent d’utiliser des appareils photographiques « grand public » et donc de se passer d’un appareillage onéreux et délicat telles les caméras métriques. De plus, cette méthode semble relativement souple dans sa mise en œuvre et son implémentation. Elle ne manquera pas d’être détaillée dans la suite de ce travail.

La DLT ne présentent cependant pas que des avantages. Les désavantages qui apparaissent être les plus contraignants sont:

- le besoin irrévocable d’utiliser un minimum de 11 points de calibration (16 points si la distorsion optique est modélisée).
- une distribution spatiale particulière des points de calibration doit à tout prix être évitée : la coplanarité.
- déterminer la position des points de calibration dans le référentiel-monde impliquera l’utilisation d’un tachéomètre, outil certes onéreux mais disponible à l’Université de Liège.

Ainsi, au terme de ce qui vient d’être décrit, la DLT serait apte à pouvoir restituer tri dimensionnellement tout objet figurant sur au moins deux images.

« Tout objet figurant sur au moins deux images » pose problème. En effet comment identifier, sur deux photographies différentes, les deux points qui sont les images d’un même point sur le terrain ? Ces deux points sont appelés « points homologues ».

Cette opération peut bien sûr être facilement réalisée manuellement mais, appliquée à tous les points de l’image, elle prendrait un temps considérable. Il faut dès lors imaginer une solution automatique de détection des points homologues. La suite a pour but d’exposer plusieurs solutions, de la plus simple à la plus aboutie. Néanmoins, gardons à l’esprit que ce problème de détection des points homologues fait encore à l’heure actuelle couler beaucoup d’encre.

La tentative de réponse la plus simple est de considérer l’intensité du pixel dans la première image et de localiser un pixel de même intensité dans la seconde image. Plusieurs difficultés ou ambiguïtés apparaissent (Hullo et Grussenmeyer, 2010):

- ce pixel peut ne pas exister ;
- ce pixel peut exister mais ne pas avoir la même intensité ;
- plusieurs pixels peuvent correspondre à cette intensité.

En outre, plus la résolution des images augmente, plus le nombre de pixels à faire correspondre augmente : un appariement brut entraîne une explosion combinatoire (Hullo et Grussenmeyer, 2010).

La solution pour réduire ces ambiguïtés est de considérer non pas un seul pixel mais l’intensité d’un pixel et de ses voisins de sorte à comparer via des scores de corrélation une fenêtre autour du pixel dans la première image et une autre fenêtre dans la seconde image.

Pour pallier au problème d’explosion combinatoire, il faut restreindre le nombre de tests d’appariement et ce en utilisant par exemple, la géométrie épipolaire. En effet, pour chaque point observé dans une image, le même point sera situé dans l’autre image le long d’une ligne épipolaire. Cette ligne épipolaire est l’intersection entre le plan de l’image deux et le plan défini par le centre de l’image un, le centre de l’image deux et le point à apparier. Par conséquent, la fenêtre de pixels de l’image deux doit suivre cette ligne, ce qui restreint considérablement la recherche de points homologues. La combinaison de ces deux solutions s’appelle *la corrélation épipolaire dense* (Hullo et Grussenmeyer, 2010).

Une tout autre approche pour la détection automatique de points homologues est l’extraction de points d’intérêts dans des images numériques (Kalantari et Kasser, 2008). Un point d’intérêt est détecté via une géométrie ou une forme particulière de pixels, par exemple un coin. C’est Harris et Stephens, (1988) qui pour la première fois ont utilisé ce type de détecteurs. Cette théorie a vite montré ses limites mais a évolué jusqu’à disposer d’une technique réellement fiable : la méthode SIFT (Scale Invariant Feature Transform) découverte par Lowe (2004). D’après Kalantari et Kasser (2008), « la méthode SIFT permet d’obtenir des points d’intérêts dont la détermination est peu sensible à des changements, même importants, de facteurs d’échelle et d’orientation, et aussi assez peu sensible aux variations locales de radiométrie ». Sur base de ce détecteur, un très grand nombre de points d’intérêts peuvent être obtenus, selon les paramètres définis à chaque étape du traitement, ainsi que les tolérances d’erreurs d’appariement tolérées.

3. HYPOTHESE ET ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

3.1. HYPOTHESES DE TRAVAIL

Ainsi, en réponse à la question posée, je propose de vérifier l’hypothèse suivante :

La Transformation Linéaire Directe (DLT) est-elle apte à fournir un Modèle Numérique de Surface (MNS) dynamique d’un modèle réduit de la rupture d’une retenue d’eau et ce, à une précision de l’ordre des éléments constitutifs de celle-ci et avec comme outil d’acquisition, des appareils photographiques « grand public » ?

Il semble utile de décomposer cette hypothèse pour en analyser chacun de ses éléments.

La *transformation linéaire directe* est une méthode permettant non seulement de calibrer des appareils photographiques « grand public » (et par extension des caméras) mais aussi de restituer tridimensionnellement un ensemble de points communs à plusieurs photographies.

Un *Modèle Numérique Surface dynamique*, est une représentation numérique de la surface, donc des valeurs d’altitude, d’un nombre de points d’une zone donnée qui évolue au cours du temps. La surface d’eau fait partie du MNS. Deux MNS à deux temps différent suffisent à définir un MNS dynamique.

Un *modèle réduit d’une retenue d’eau*, est un modèle physique, ou une maquette d’un barrage hydraulique à l’échelle.

Les *éléments constitutifs de la retenue d’eau* sont les éléments à partir desquels est construite la maquette (des graviers ou des agrégats d’argile, par exemple). Les éléments constitutifs de la maquette de retenue d’eau du laboratoire HECE ont un diamètre de 7 à 14 mm.

Les *appareils photographiques « grand public »*, sont des dispositifs d’acquisition d’images dont les paramètres intrinsèques sont inconnus et instables et qui ont un prix abordable (<700 €). Les appareils photographiques actuels disposent souvent de mode vidéo ou de mode de prise en rafale.

3.2. LIMITATIONS DU TRAVAIL

Dans ce travail, l’aspect dynamique sera réduit à deux temps : le temps initial, c’est-à-dire avant la rupture du barrage et le temps final, c’est-à-dire après la rupture du barrage. Cependant, la technique développée permettra d’augmenter la densité temporelle en respectant la gamme de précision souhaitée. Des recommandations et perspectives à ce sujet seront développées.

En outre, aucune partie immergée de la maquette ne sera restituée. Trois raisons principales à cela :

- L’eau dont l’indice de réfraction est différent de celui de l’air dévie les rayons lumineux. Connaissant la hauteur d’eau, cette déviation peut être modélisée. Celle-ci ne sera pas abordée dans ce travail.
- L’expérience étant relativement violente, le régime turbulent de l’eau la rend opaque.
- L’eau charriant des sédiments de faible dimension rend celle-ci turbide et donc opaque.

3.3. ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL.

L’environnement de travail est composé de trois éléments distincts nécessaires à la réalisation du travail :

- Un modèle réduit de retenue d’eau.
- Un appareillage d’acquisition de données : appareils photographiques et tachéomètre.
- Un outil informatique d’implémentation, le logiciel MATLAB.

Ces trois éléments sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.3.1. Un modèle réduit de retenue d’eau.

Le modèle physique de la retenue d’eau à l’échelle 1/30 (*figure 1*), dont la topographie doit être étudiée est inséré dans un bac en parpaings. Cet édifice, réalisé lors d’un travail d’étudiants (Bodeux et al., 2014) est composé :

- en amont d’un bassin qui peut se remplir d’eau via un système de pompes ;
- dans sa partie centrale, du corps de la retenue d’eau ;
- dans sa partie aval, d’un exutoire qui aboutit à des évacuateurs d’eau.



Figure 1 - Modèle réduit de la retenue d'eau.

A noter la présence sur la droite du barrage (à gauche de la photo) d’un dispositif évacuateur de crue qui sera obstrué lors de l’expérience afin de simuler une surverse.

Une coupe de profil de cette retenue d’eau est présentée à la *figure 2*.

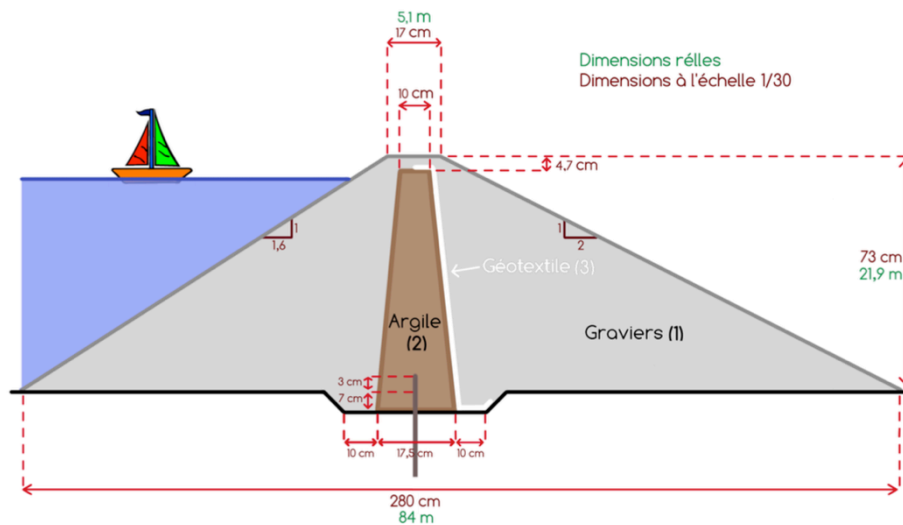


Figure 2 - Coupe longitudinale de la retenue d'eau.

Source : (Bodeux et al., 2014)

Les dimensions de cet édifice sont une longueur de 2,80m pour une hauteur de 0,73 m. Il est composé :

- en son cœur, d'un noyau d'argile dont le but est l'étanchéité (2) ;
- d'un enrochement stabilisateur en graviers calcaires de calibre 7-14mm (1) ;
- d'un filtre en géotextile en partie avale (3) ;
- et d'un dispositif d'étanchéité en acier empêchant une infiltration sous le barrage.

La restitution tridimensionnelle se focalisera sur le sommet et la pente avale du dispositif, éléments principaux d'intérêt.

3.3.2. Un ensemble d'appareils de mesures

Deux types d'appareils d'acquisition de données sont utilisés :

- quatre appareils photographiques grand public ;
- un tachéomètre.

Appareils photographiques

Quatre appareils photographiques numériques grand public sont utilisés (figure 3). Les éléments communs à ces outils sont, en comparaison avec des appareils photographiques métriques, d'une part leur prix inférieur à 700€ (à l'heure actuelle) et d'autre part l'inconnaissance de leurs paramètres intrinsèques (focale, distorsions optiques, point principal).



Canon EOS 50d

Canon EOS 400d

Kodak EasyShare Z712

Sony Nex-6

Figure 3 –Appareils photographiques grand-public employés

Source : (“Canon”, “Kodak”, “Sony”)

Leurs caractéristiques techniques sont résumées dans le *tableau 2*.

Tableau 2 - Caractéristiques techniques des appareils photographiques.

Dénomination dans ce travail	Boîtier	Objectifs	Capteur	Taille du capteur (pixels)	Taille du capteur (mm)	ratio	Taille pixels (um)
nex	Sony NEX-6	Sony 16-50 mm f/3.5-5.6	CMOS	4912 x 3264 (16,1 Mpixels)	23,5 x 15,6	3:2	4,8
400d	Canon EOS-400d	Canon 18-55 mm f/3,5-5,6	CMOS	3888 x 2592 (10,1 Mpixels)	22,2 x 14,8	3:2	5,7
50d	Canon EOS-50d	Canon 18-135 mm f/3.5-5.6	CMOS	4752 x 3168 (15,1 Mpixels)	22.3 x 14.9	3:2	4,7
kodak	Kodak Easyshare Z712	zoom intégré	CCD	3072 x 2304 (7,1 Mpixels)	non communiqué	4:3	-

Source : (“Canon”, “Kodak”, “Sony”)

Les considérations suivantes, relatives aux éléments de base d’un appareil photographique, sont basées sur Apple Computer, Inc (2005).

Un appareil photographique numérique est composé d’un boîtier hermétique à la lumière, d’un objectif et d’un capteur d’image. Ces trois composants principaux sont accompagnés de :

- Un *objectif* composé d’une succession d’éléments en verre conçus pour réfracter et mettre au point la lumière réfléchie provenant d’une scène. Une notion fondamentale associée à l’objectif est la longueur focale. Celle-ci est définie comme « la distance entre le point, sur l’axe optique, où les rayons de lumière convergent et le point où les rayons de lumière qui traversent l’objectif sont mis au point sur le plan de l’image ».
- Un *diaphragme*, qui est l’ouverture dans l’objectif permettant de laisser passer une certaine quantité de lumière. Elle se mesure en valeurs d’ouverture du diaphragme. La valeur d’ouverture du diaphragme, combiné à la longueur focale détermine la profondeur de champ. La profondeur de champ est la zone mise au point, ou nette de l’image.
- Un *obturateur*, est un mécanisme qui contrôle le temps que la lumière passe par l’objectif. Ce temps est appelé *temps de pose*, qui est exprimée en secondes. L’obturateur et le diaphragme permettent de contrôler la quantité de lumière touchant le capteur d’image.
- Un *capteur d’image* numérique, est une puce électronique composée de million d’éléments capables de capturer la lumière. Ces éléments transforment l’intensité lumineuse reçue en tension, convertie à son tour en données numériques. Les capteurs numérique sont associés à deux éléments fondamentaux : la résolution, la sensibilité ISO. La résolution est le nombre de millions de pixels que les éléments photosensibles peuvent capturer. La sensibilité ISO (International Standards Organization) définit une norme pour mesurer la sensibilité relative des capteurs. Plus le classement ISO est élevé, plus le capteur est sensible à la lumière. Une sensibilité élevée engendre cependant un bruit numérique qui dégrade la qualité technique des photos.

Les réglages de ces différents éléments influent sur la qualité de l’image acquise, notamment son exposition, sa netteté et son piqué. En fonction des expériences réalisées dans ce travail, la combinaison des réglages de ces éléments sera explicitée.

Un Tachéomètre

Le tachéomètre LEICA 1202+ (*figure 4*) est utilisé afin d’obtenir la position tridimensionnelle des cibles de calibration. Il est la combinaison d’un théodolite, qui mesure des angles horizontaux et verticaux et d’un distance-mètre électronique, qui mesure des distances. Son utilisation sera détaillée dans la *section 11.2*.



Figure 4 - Tachéomètre LEICA

source : (“Leica”)

3.3.3. Un outil informatique d’implémentation

L’un des buts du travail est de construire des algorithmes alliant la théorie de la DLT et considérations d’ordre pratique. L’implémentation est réalisée sous l’environnement MATLAB r2013a, qui constitue un langage à haut niveau et qui est largement utilisé par la communauté scientifique. Les modules implémentés pourront dès lors être facilement modifiés, améliorés, partagés et intégrés à d’autres solutions.

PARTIE II - DEVELOPPEMENTS THEORIQUES ET VALIDATIONS

4. INTRODUCTION

Ce chapitre se rapporte au cœur de la proposition de réponse à la question de recherche : la théorie de la Direct Linear Transformation (DLT) découverte et développée par Aziz et Karara (1971).

Ce chapitre débutera par la démonstration de cette théorie dans sa version la plus simple. Celle-ci est très largement inspirée du développement réalisé par Kwon (1998). De la compréhension de la théorie découleront d’importantes considérations pratiques.

L’implémentation de celle-ci dans l’environnement MATLAB sera présentée et une première application du programme sur une maquette en Lego sera réalisée. L’objectif de l’application de la théorie sur la maquette Lego est triple : valider la théorie, détecter des améliorations et en tirer des enseignements d’ordre pratique pour l’application sur la maquette de retenue d’eau.

La prise en compte de la distorsion optique engendrée par les objectifs des appareils photos, amélioration majeure, sera ajoutée à la théorie initiale. Un modèle de distorsion intégré à l’algorithme sera confronté à la pratique en vue de le valider.

L’objectif de ce chapitre est donc d’exposer la théorie générale de la DLT, de l’améliorer mais surtout de construire un algorithme robuste sous MATLAB ainsi que d’acquérir suffisamment d’expérience afin d’aborder sereinement l’application à la maquette de retenue d’eau.

5. THEORIE DE LA DLT A 11 PARAMETRES

5.1. FORMULATION DES EQUATIONS FONDAMENTALES

Le fondement de la théorie de la DLT repose sur la relation linéaire qu’il existe entre un point localisé dans le monde, sa projection sur le plan image et le centre optique de la caméra. En effet, si l’on choisit en première approximation le modèle de caméra dit « à trou d’épingle » (*pinhole* en anglais), un rayon lumineux issu d’un point O dans le monde aboutit en I' sur le plan du capteur en passant par le « trou d’épingle » (ou centre de projection) de la caméra. La *figure 5* illustre ce concept.

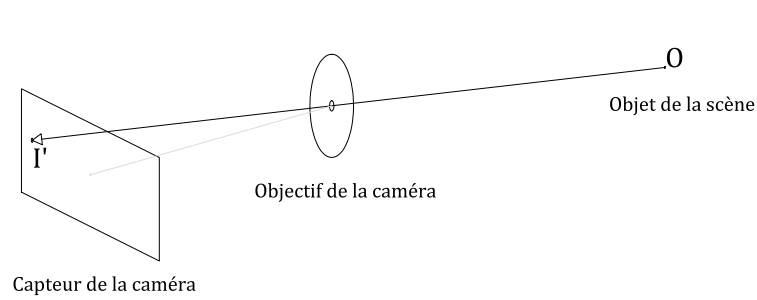


Figure 5 - Modèle de caméra « à trou d'épingle ».

Par extension, l'ensemble de la scène comprise dans le champ de vue de la caméra est projeté de façon linéaire sur le capteur de l'appareil photo. Le passage par le centre de projection implique que l'image formée sur le capteur est inversée (négatif). Il suffit de la re projeter pour la renverser et obtenir un positif, ce qui simplifiera les considérations futures (figure 6).

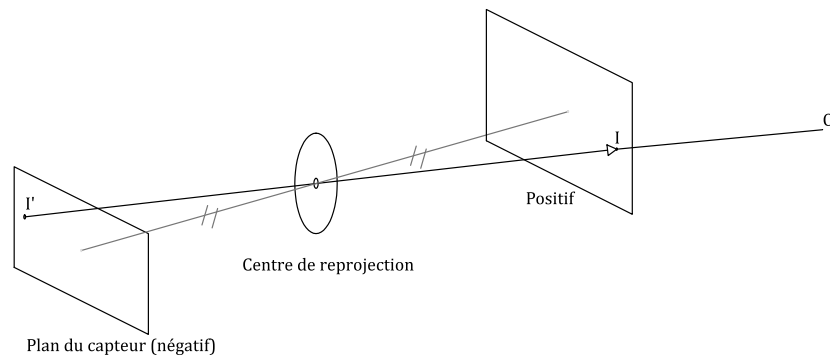


Figure 6 - Négatif et positif (reprojection).

Considérons maintenant deux référentiels orthogonaux différents (figure 7) :

- le référentiel-monde $[XYZ]$ orthogonal dont l'origine est placé arbitrairement dans le monde ;
- le référentiel-image $[UV]$ orthogonal et propre au plan image dont l'origine est placée pour le moment en bas à gauche du positif. Dans la suite l'origine et l'orientation de ces axes seront modifiées pour rejoindre certaines conventions propres à la détermination de coordonnées dans une image.

Dans le référentiel-monde, l'objet O a pour coordonnées (x, y, z) tandis que le point image I dans le référentiel-image a pour coordonnées (u, v) .

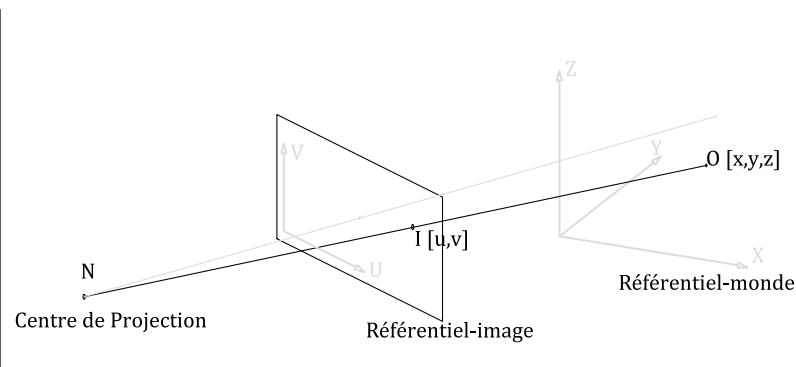


Figure 7 - Définition du référentiel-image et du référentiel-monde.

En l’absence de distorsion optique, les points I , O et N appartiennent à une même droite. On peut définir les vecteurs \vec{NI} et \vec{NO} qui ont la même direction. Ils sont donc colinéaires. La colinéarité est le principe fondamental de la DLT.

Les coordonnées du centre de projection exprimées dans le référentiel monde sont (x_0, y_0, z_0) . Dès lors, le vecteur \vec{NO} a pour coordonnées $(x-x_0, y-y_0, z-z_0)$ (figure 8).

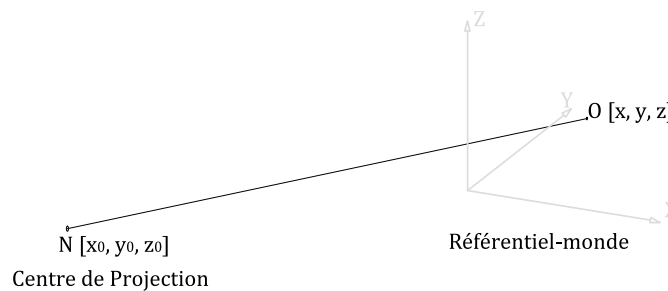


Figure 8 - Expression du centre de projection dans le référentiel-monde.

Un axe W est ajouté au référentiel-image pour définir le vecteur position d’un point dans un référentiel tri dimensionnel (figure 9). Dans ce référentiel le point I , a pour coordonnées $(u, v, 0)$.

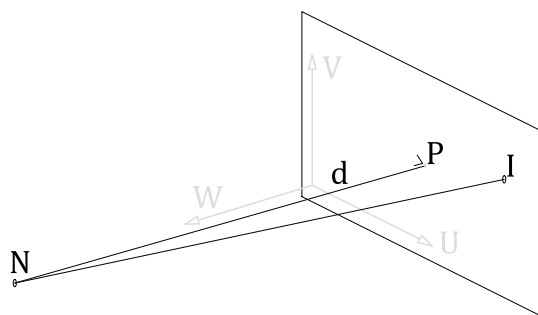


Figure 9 - Point principal et distance principale.

Un nouveau point (P) est introduit. Il est appelé point principal et résulte de l’intersection entre le plan image et l’axe optique, parallèle à W et donc perpendiculaire au plan image. Le point principal P a pour coordonnées $(u_0, v_0, 0)$.

La distance principale notée d , est définie comme la distance entre le centre de projection N et le point principal P .

Le centre de projection dont les coordonnées ont été précédemment exprimées dans le référentiel-monde, peut aussi être exprimé dans le référentiel-image. Ainsi, le centre de projection N a pour coordonnées (u_0, v_0, d) . Dès lors, dans ce même référentiel, le vecteur \overrightarrow{NI} a pour coordonnées $(u-u_0, v-v_0, -d)$.

Les vecteurs NI et NO étant colinéaires, ils sont proportionnels :

$$\overrightarrow{NI} = c\overrightarrow{NO} \quad [1]$$

Où c est un facteur d’échelle.

Le vecteur \overrightarrow{NI} a préalablement été défini dans le référentiel-image alors que le vecteur \overrightarrow{NO} a été défini dans le référentiel-monde. Pour pouvoir mettre en relation ces deux vecteurs, il est nécessaire de les exprimer dans un référentiel commun. Exprimons \overrightarrow{NO} dans le référentiel-image par l’intermédiaire d’une matrice de transformation T .

$$T_{I/M} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{NI}_I = T_{I/M} \cdot \overrightarrow{NI}_M = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \overrightarrow{NI}_M \quad [2]$$

Où \overrightarrow{NI}_I est \overrightarrow{NI} décrit dans le référentiel-image,

\overrightarrow{NI}_M est \overrightarrow{NI} décrit dans le référentiel-monde et

$T_{I/M}$ est la matrice de transformation entre le référentiel-monde et le référentiel-image.

Si on applique [2] dans [1], la relation sous forme matricielle s’écrit :

$$\begin{pmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -d \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad [3]$$

Ou sous forme d’équations :

$$\begin{aligned} u - u_0 &= c (r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)) \\ v - v_0 &= c (r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)) \\ -d &= c (r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)) \end{aligned} \quad [4]$$

A partir de [4], on peut extraire :

$$c = \frac{-d}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \quad [5]$$

Si on injecte [5] dans [4]

$$u - u_0 = -d \frac{(r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0))}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)}$$

$$v - v_0 = -d \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)}$$

[6]

Le référentiel-image impose d’exprimer u , v , u_0 et v_0 en unité de longueur (mètre, centimètre,...). Cependant, lors de la digitalisation (la détermination des coordonnées d’un point dans l’image), les points-images sont exprimés en pixels. Dès lors, un facteur de conversion doit être intégré au système.

$$u - u_0 \Rightarrow \lambda_u(u - u_0)$$

$$v - v_0 \Rightarrow \lambda_v(v - v_0)$$

Où λ_u et λ_v sont respectivement le facteur de conversion d’unité selon U et selon V. Un facteur de conversion propre à chacun des axes pourrait avoir son importance si par exemple les pixels ne sont pas carrés mais rectangulaires.

[6] devient alors :

$$u - u_0 = \frac{-d}{\lambda_u} \frac{(r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0))}{(r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0))}$$

$$v - v_0 = \frac{-d}{\lambda_v} \frac{(r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0))}{(r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0))}$$

[7]

Si [7] est réarrangé pour mettre en évidence u , v les coordonnées image (en pixels) ainsi que x , y , z , les coordonnées-monde (en unités métriques) :

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}$$

[8]

Ces deux dernières équations sont les équations fondamentales de la DLT. Elles expriment la relation linéaire entre la position d’un objet dans le référentiel-monde (exprimé en unités métriques) et la projection de celui-ci dans le référentiel-image (exprimé en unités pixels).

Les coefficients L_1 à L_{11} sont les paramètres de la DLT. Leur signification géométrique n’est pas directement perceptible mais ils s’expriment en fonction de 11 variables du dispositif (Guerra et Balletti, 1998):

- Trois paramètres intrinsèques de la caméra : la position du point principal (u_0, v_0) ainsi que la distance principale d .
- Six paramètres extrinsèques de la caméra : la position du centre de projection (x_0, y_0, z_0) et les trois angles de rotation de la caméra dans le référentiel-monde (ω, ϕ, κ) respectivement selon les axes X, Y et Z.
- Les deux paramètres restants peuvent être interprétés comme un facteur d’échelle selon U et V ainsi qu’un cisaillement (*shear*) entre les axes U et V.

Ces 11 paramètres modélisent les caractéristiques des prises de vue.

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \\
 L_2 &= \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \\
 L_3 &= \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \\
 L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \\
 L_5 &= \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \\
 L_6 &= \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \\
 L_7 &= \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\
 L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \\
 L_9 &= \frac{r_{31}}{D} \\
 L_{10} &= \frac{r_{32}}{D} \\
 L_{11} &= \frac{r_{33}}{D}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

En fonction des inconnues et de données connues, les équations fondamentales de la DLT [8] peuvent être utilisées (*figure 10*) :

- pour la calibration des caméras : à partir d’un certain nombre de points dont les coordonnées-mondes et les coordonnées images sont connues, les 11 paramètres de la DLT, propres à une prise de vue sont estimés ;
- pour la reconstruction tridimensionnelle : connaissant les 11 paramètres de la DLT de chaque prise de vue, la position d’objets dans le référentiel-monde est estimée à partir

de leurs coordonnées-images. Pour avoir suffisamment de données connues, plusieurs caméras photographiant le même objet depuis plusieurs points de vue sont nécessaires.

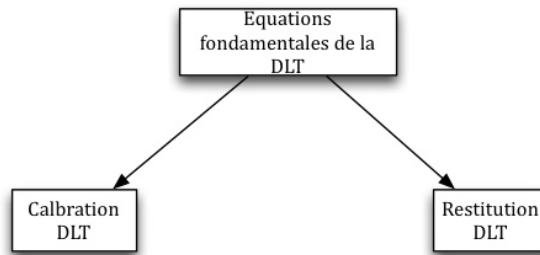


Figure 10 - Diagramme récapitulatif de la DLT.

La calibration ainsi que la restitution à partir des équations fondamentales de la DLT sont détaillées dans les sections suivantes.

5.2. FORMULATION DES EQUATIONS DE CALIBRATION

Dans l’étape de calibration d’une prise de vue, on photographie une scène dans laquelle les positions (x, y, z) d’un certain nombre de points, appelés « points de calibration » (PC) sont parfaitement connues. Vient ensuite la phase de digitalisation, c’est-à-dire la détermination de la position en pixels (u, v) dans l’image de ces mêmes PC.

Les deux données connues sont donc la position des PC dans le référentiel-image et dans le référentiel-monde. La calibration aboutira à l’estimation des 11 paramètres L_1 à L_{11} pour chaque prise de vue.

Remarquons que l’on ne calibre pas à proprement dit la caméra, mais plutôt un cliché issu d’une caméra. Dès lors si la caméra est bougée en position ou en orientation), ou si un paramètre de celle-ci est modifié (par exemple la longueur focale) une nouvelle calibration doit être effectuée.

5.2.1. Formulation du système

En réarrangeant les équations fondamentales de la DLT [8], on peut obtenir :

$$\begin{aligned} u &= L_1x + L_2y + L_3z + L_4 - L_9xu + L_{10}yu + L_{11}zu \\ v &= L_5x + L_6y + L_7z + L_8 - L_9xv + L_{10}yv + L_{11}zv \end{aligned} \quad [10]$$

Qui, sous forme matricielle, équivaut à :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_9 \\ L_{10} \\ L_{11} \end{pmatrix} \quad [11]$$

Pour chacun des PC dont les coordonnées sont connues tant sur l’image que dans le monde, on obtient deux équations avec 11 inconnues, les 11 paramètres de la DLT modélisant le dispositif

de prise de vue. La résolution du système demande un minimum de 6 PC (12 équations pour 11 inconnues).

Pour $n \geq 6$ le système d’équations sous forme matriciel s’écrit :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{pmatrix}}_{\substack{A \\ [2n \times 11]}} \underbrace{\begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \vdots \\ L_9 \\ L_{10} \\ L_{11} \end{pmatrix}}_{\substack{L \\ [11 \times 1]}} = \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{pmatrix}}_{\substack{b \\ [2n \times 1]}} \quad [12]$$

On peut réécrire [12],

$$A.L = b$$

Ce système étant surdéterminé, il n’existe pas de solution pour les paramètres L . La méthode des moindres carrés est alors utilisée pour fournir une meilleure approximation \hat{L} des paramètres L .

5.2.2. Résolution du système

L’explication du choix de la méthode de résolution de ce système d’équations est directement inspiré du livre de référence à ce sujet de Lay et Citta-Vanthemsche (2004).

Lorsque une solution d’un système surdéterminé est exigée, la meilleure solution est de chercher un L qui rende $A.L$ le plus proche possible de b (Lay et Citta-Vanthemsche, 2004). Intuitivement, plus la distance entre b et AL , donnée par $\|b - AL\|$, est petite, meilleure est l’approximation. Dès lors, le problème général des moindres carrés est de trouver un L qui rende $\|b - AL\|$ aussi petit que possible.

Toujours selon ces auteurs, il apparaît que l’ensemble des solutions au sens des moindres carrés de $A.L=b$ coïncide avec l’ensemble non vide des solutions des équations normales :

$$A^T A L = A^T b$$

Si la matrice $A^T A$ est inversible, l’équation $A.L=b$ n’a qu’une solution \hat{L} au sens des moindres carrés qui est donnée par

$$\hat{L} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

Cependant, le système des équations normales peut souffrir d’un mauvais conditionnement. Ceci implique que de légères erreurs de calcul des éléments de $A^T A$ aboutissent à des erreurs importantes dans la solution \hat{L} . Une manière de se prémunir de ce problème est de calculer la solution au sens des moindres carrés par le biais d’une factorisation QR de A .

La décomposition QR de A s’exprime comme suit : soit A une matrice quelconque de dimension (n, m) , il existe une matrice Q orthogonale de dimension (n, n) et une matrice R triangulaire supérieure de dimension (n, m) telles que $A=QR$.

Lay et Citta-Vanthemsche (2004) proposent alors le théorème suivant : Etant donné une matrice A de genre (n, m) dont les colonnes sont linéairement indépendantes, soit $A=QR$ une factorisation QR de A , alors l'équation $AL=b$ possède une solution au sens des moindres carrés unique donnée par

$$\hat{L} = R^{-1}Q^T b$$

En considérant des aspects numériques, il est en réalité beaucoup plus rapide de résoudre cette dernière équation par substitution à rebours plutôt que de calculer R^{-1} (Lay and Citta-Vanthemsche, 2004). C'est donc cette démarche qui sera implémentée. Ernst (2006), dans son mémoire au sujet de la DLT était arrivé à ces mêmes conclusions.

5.2.3. Qualité de la calibration

L'évaluation de la qualité de la calibration de chaque prise de vue est cruciale. Elle est basée sur les écarts ou résidus entre les coordonnées-images des PC et leur re projection via les 11 paramètres L ainsi que les coordonnées-mondes des PC [12].

$$\begin{aligned} \varepsilon_{u_i} &= u_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1} \\ \varepsilon_{v_i} &= v_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1} \end{aligned} \quad [13]$$

En outre, la Root Mean Square Error (RMSE) tiendra le rôle d'indicateur global de la qualité de la calibration. Il s'agit d'une mesure de l'incertitude sur la position calculée par le modèle de calibration.

$$RMSE_{Calibration} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_{u_i}^2 + \varepsilon_{v_i}^2} \quad [14]$$

Où n est le nombre de PC utilisé pour la calibration.

Ces trois indicateurs sont exprimés en pixels. A noter que l'indicateur RMSE donne plus d'importance aux grands résidus.

5.2.4. Obtention de grandeurs physiques

En outre, il est possible via les 11 paramètres de déterminer la position du centre de projection des caméras utilisées. Cette grandeur physique est bien plus appréciable que les paramètres L , qui restent difficilement interprétables géométriquement.

A partir de [9] et si la matrice comportant les paramètres L_i est inversible, la position du centre de projection (x_0, y_0, z_0) peut être obtenue par :

$$\begin{aligned} L_1 x_0 + L_2 y_0 + L_3 z_0 &= -L_4 \\ L_5 x_0 + L_6 y_0 + L_7 z_0 &= -L_8 \\ L_9 x_0 + L_{10} y_0 + L_{11} z_0 &= -1 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{pmatrix} \quad [15]$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{pmatrix}$$

La détermination du centre de projection permet en outre d'évaluer la qualité de la calibration, à condition que la position des caméras ait été mesurée au préalable.

5.3. FORMULATION DES EQUATIONS DE RESTITUTION

La restitution tridimensionnelle vise à déterminer la position (x, y, z) d'un objet connaissant sa position (u, v) dans plusieurs images et les 11 paramètres de calibration de ces images.

La *figure 11* illustre une situation de restitution. L'objectif est de déterminer la position du point $M(x, y, z)$. Analysons le dispositif d'acquisition d'images.

- La caméra 1 calibrée (les 11 paramètres L^1 de la DLT ont été déterminés)
- La caméra 2 calibrée (les 11 paramètres L^2 de la DLT ont été déterminés)

Le point M est projeté dans l'image 1 en $I1 (u^1, v^1)$ et dans l'image 2 en $I2 (u^2, v^2)$. On appelle $I1$ et $I2$ des points homologues. C'est-à-dire des points-images qui correspondent à un même point du monde.

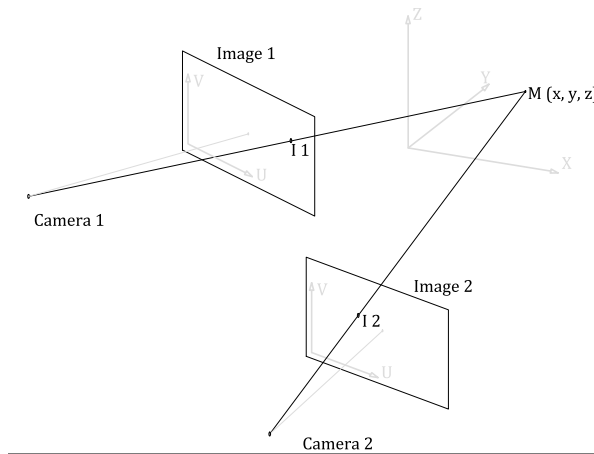


Figure 11 - Représentation d'une restitution.

Une **formulation du système** d'équations peut être obtenue en reconsidérant les équations fondamentales de la DLT [8] sous un autre angle, afin de les exprimer en fonction de x, y et z .

$$\begin{aligned} (uL_9 - L_1)x + (uL_{10} - L_2)y + (uL_{11} - L_3)z &= (L_4 - u) \\ (vL_9 - L_5)x + (vL_{10} - L_6)y + (vL_{11} - L_7)z &= (L_8 - v) \end{aligned} \quad [13]$$

Sous forme matricielle,

$$\begin{pmatrix} uL_9 - L_1 & uL_{10} - L_2 & uL_{11} - L_3 \\ vL_9 - L_5 & vL_{10} - L_6 & uL_{11} - L_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_4 - u \\ L_8 - v \end{pmatrix} \quad [14]$$

Pour une prise de vue, deux équations pour trois inconnues (x, y, z) sont obtenues. Le système est sous-déterminé. Dès lors, un minimum de deux caméras est pris en compte pour restituer la position tridimensionnelle dans le référentiel-monde d’un objet présent sur les deux images.

Ainsi, pour $m \geq 2$ caméras, le système matriciel s’écrit :

$$\begin{pmatrix} u^{(1)}L_9^{(1)} - L_1^{(1)} & u^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_2^{(1)} & u^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_3^{(1)} \\ v^{(1)}L_9^{(1)} - L_5^{(1)} & u^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_6^{(1)} & u^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_7^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u^{(m)}L_9^{(m)} - L_1^{(m)} & u^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_2^{(m)} & u^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_3^{(m)} \\ v^{(m)}L_9^{(m)} - L_5^{(m)} & u^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_6^{(m)} & u^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_7^{(m)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_4^{(1)} - u^{(1)} \\ L_8^{(1)} - v^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - u^{(m)} \\ L_8^{(m)} - v^{(m)} \end{pmatrix} \quad [15]$$

La **résolution de ce système**, comme pour la calibration s’effectue par la méthode des moindres carrés expliquée à la *section 4.2.2.2*.

Au même titre que la qualité de la calibration, il est important de pouvoir juger de la **qualité de la restitution** tridimensionnelle. La construction des indicateurs de la restitution se base sur des points de vérification (PV). Ces points, complètement indépendants du calcul de la calibration et dont les coordonnées-mondes et images pour chaque point de vue sont connues, sont restitués via le système [15].

La qualité de la restitution est basée sur la comparaison entre les coordonnées-mondes obtenues par mesure $(x_\varphi, y_\varphi, z_\varphi)$ et par l’algorithme de restitution (x, y, z) de chaque PV:

$$\begin{aligned} \epsilon_{x_i} &= x_{\varphi_i} - x_i \\ \epsilon_{y_i} &= y_{\varphi_i} - y_i \\ \epsilon_{z_i} &= z_{\varphi_i} - z_i \end{aligned} \quad [16]$$

Le RMSE de la restitution intègre l’ensemble des écarts selon les axes X, Y et Z et pour les n PV utilisés selon :

$$RMSE_{restitution} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\epsilon_{x_i}^2 + \epsilon_{y_i}^2 + \epsilon_{z_i}^2} \quad [17]$$

Ces indicateurs sont exprimés dans les mêmes unités métriques que celles choisies pour le référentiel-monde. En outre, la RMSE est l’indice le plus largement utilisé pour évaluer la qualité d’un MNS. (Gabriela, 2008)

Afin d’évaluer au mieux la répartition des erreurs de restitution, un nombre suffisant de PV doit idéalement être uniformément réparti sur la scène. Certains PV peuvent se situer en dehors de la zone délimitée par les points de calibration. Le pouvoir d’extrapolation de l’algorithme pourra ainsi être évalué.

5.4. CONSEILS D’ORDRE PRATIQUE

Les applications de la DLT ne manquent pas dans la littérature. Dans cette section sont répertoriés les conseils de sa mise en œuvre.

Les conseils qui suivent sont directement tirés de Kwon, (1998) et Chen et al. (1994):

- Au-delà de 20 à 30 PC disposés sur l’entièreté de la scène à restituer, l’amélioration de la calibration n’est plus significative ;
- ceux-ci doivent être répartis le plus uniformément possible sur la scène;
- la redondance du système améliore la fiabilité de la calibration. Il faut cependant veiller à ce que les PC ne soient pas tous disposés dans un même plan sous peine d’aboutir à un cas dégénéré ;
- pour la restitution, un maximum de caméras doit être utilisé pour augmenter la redondance du système et aboutir à une résolution par moindre carré plus fiable.

6. DLT A 11 PARAMETRES – VALIDATION PAR UNE APPLICATION

6.1. INTRODUCTION

Le besoin de confronter cette théorie à la pratique s’est rapidement fait ressentir afin de la valider, d’en juger la qualité et d’envisager des améliorations ou des modifications. A ce stade, la restitution s’effectue uniquement sur base des PV. L’application ne conduira donc pas à une restitution complète de la scène, l’élément manquant étant la détection de points homologues.

Trois éléments conduisent à l’application de la théorie (*figure 12*): une implémentation de la théorie, un objet d’étude et un protocole d’acquisition de données. L’application de la DLT aboutit à sa validation ou son amélioration.

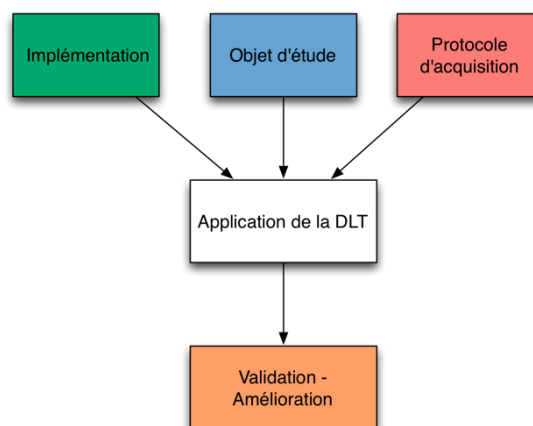


Figure 12 - Eléments indispensables à l’application de la théorie

Pour faciliter la première application de la théorie, **l’objet d’étude** sur lequel expérimenter les algorithmes de calibration et de restitution doit répondre à plusieurs critères :

- objet de faibles dimensions, léger et portable présentant un relief ;
- détermination rapide et précise des coordonnées-mondes des PC et PV ;

- éclairage optimal de l’objet ;
- détection aisée et précise des points à digitaliser dans les différents clichés;
- construction et modulation aisée ;
- faible coût.

Un objet satisfaisant l’ensemble de ces critères est une maquette en blocs « Lego » de dimensions 200 x 150 x 80 mm (*figure 13*). Celles-ci correspondent approximativement à 1/40 de la scène de la retenue d’eau.

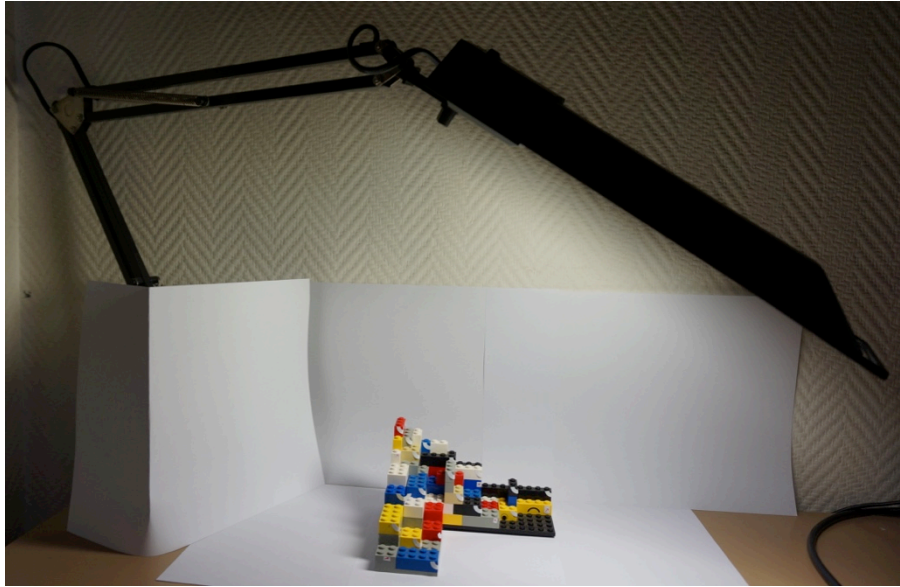


Figure 13 - Objet d’étude, maquette Lego.

La maquette est construite par l’empilement de blocs dont les dimensions sont connues. Ceci permet de mesurer les coordonnées-mondes des PC et PV rapidement et précisément.

Les PC sont placés sur les coins des blocs Lego colorés et marqués d’un autocollant pour faciliter leur positionnement. Leurs coordonnées-images exprimées en pixels sont déterminées avec précision car les coins sont facilement identifiables sur les photographies. En outre, des PV sont dispersés sur la maquette. Ils serviront à l’évaluation de la qualité de la restitution.

D’autres parts l’objet étant de faibles dimensions, léger et extrêmement mobile, un éclairage optimal de la scène est ainsi facile.

Le second élément indispensable à l’expérimentation est une **implémentation de la théorie**. La théorie de la DLT est implémentée sous MATLAB. Il s’agit d’un langage de haut niveau et un environnement interactif pour le calcul numérique (“Mathworks - Matlab”).

Deux programmes seront créés. Le premier sert à la calibration des prises de vue, le deuxième sert à la restitution. L’implémentation de ces programmes sera détaillée dans les sections dédiées (*cf. section 4.3.3 et 4.3.4*).

La troisième étape est l’élaboration d’un protocole **d’acquisition de données**. Ce protocole rend compte de la distribution spatiale des PC et PV, de leur digitalisation et la détermination de leurs coordonnées-mondes ainsi que la prise de photographies de la scène. Il sera lui aussi détaillé dans la section dédiée (*cf. 4.3.2*).

Le schéma suivant (*figure 14*) donne une vision globale de l’ensemble de la démarche suivie afin de valider la DLT.

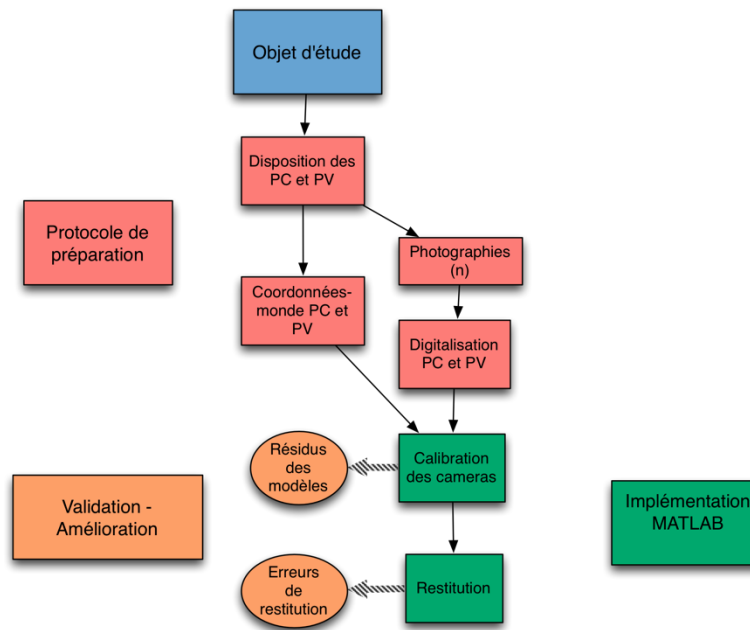


Figure 14 - Démarche générale de validation de la DLT.

6.2. PROTOCOLE D’ACQUISITION

Les encadrés colorés en rouge de la *figure 14* résument le protocole imaginé afin d’acquérir les données indispensables au fonctionnement des algorithmes de calibration et de restitution.

Dans un premier temps, les points de calibration et de vérification sont distribués sur l’objet à restituer. Ensuite, les coordonnées-mondes de ces points sont mesurées. Parallèlement, plusieurs photographies de la scène sont effectuées depuis différentes positions et différents angles de vue. Pour chacun des clichés, les positions des PC et PV dans chacune des images sont digitalisées.

6.2.1. Distribution spatiale des PC et PV

La théorie indique qu’un minimum de six PC est indispensable pour la calibration des caméras. Cependant, la méthode des moindres carrés prend tout son sens lorsqu’un surplus d’observations est ajouté au système. A priori, plus le nombre de PC sera important, au mieux les paramètres seront estimés. Cependant, plus le nombre de PC est important, plus la phase de digitalisation sera longue et plus l’utilisation de la DLT sera accablante. Un équilibre entre amélioration des résidus et temps de la digitalisation doit être recherché. De plus, la littérature indique à ce sujet que les résidus ne diminuent plus à partir d’une vingtaine de PC (Chen et al., 1994). En fait, il est plus important d’assurer une bonne distribution spatiale représentative de l’objet qu’un grand nombre de PC.

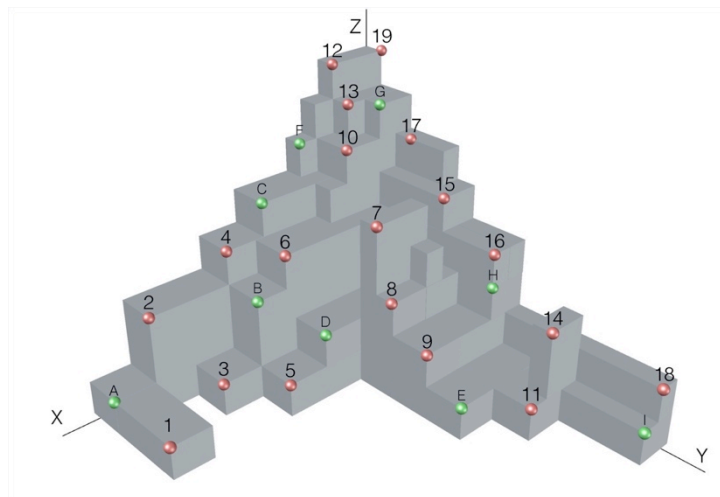


Figure 15 - Distribution des PC (rouge) et PV (vert) sur la scène.

La maquette « Lego » est équipée de 19 PC (figure 15 – sphères rouges) qui sont répartis de manière uniforme sur la maquette. Ces points forment une zone de calibration entourant la zone à restituer.

En outre, 9 PV sont disposés sur la maquette (figure 15 – sphères vertes). Ils permettront de juger de la qualité de la restitution de la maquette. Certains PV sont placés en dehors de la zone de calibration afin d’évaluer le pouvoir d’extrapolation de l’algorithme (A, E et I).

6.2.2. Détermination des coordonnées-mondes

Les coordonnées-mondes (x, y, z) des PC et PV doivent être déterminées. L’avantage de l’utilisation de blocs « Lego » sont les dimensions connues de ces briques (figure 16) et la possibilité de placer les PC et PV sur les coins de ceux-ci. Cela permet de calculer leur position par simple addition. Les dimensions d’un bloc d’une unité sont de 8 x 8 x 9,6 mm.

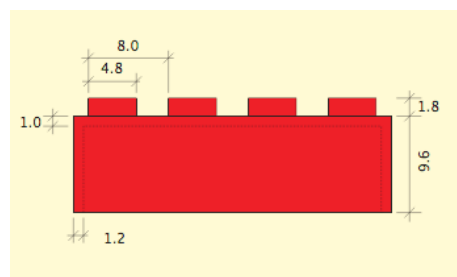


Figure 16 - Dimensions des blocs Lego.
Source : (Caillau)

Ces données sont considérées comme exactes, non entachées d’erreurs. Les résultats du calcul des coordonnées monde pour les PC et PV sont présentés en annexe (Annexe numérique).

6.2.3. Acquisition des images

Disposition des appareils

Une fois les PC et PV placés, la phase d’acquisition d’images peut débuter.

L’appareil photo numérique utilisé est un Sony Nex-6 avec objectif 16-55mm dont les caractéristiques techniques les plus importantes sont répertoriées dans le *tableau 2*.

Trois clichés ont été effectués à partir de 3 positions et selon des angles de vue différents. La position de ces points de vue respecte certaines conditions :

- chacun d’eux permet d’obtenir des clichés de la scène entière sur laquelle toutes les PC et PV sont visibles ;
- chacun d’eux est suffisamment proche de la scène afin de tirer profit de la résolution maximale de l’image. En effet, plus la caméra est proche de la scène, plus la projection de celle-ci se répartira sur un grand nombre de pixels.
- L’écart entre les positions des prises de vue est théoriquement responsable de la précision de la restitution.

Concernant la troisième condition : en photogrammétrie aérienne, la précision de la restitution est en partie définie par le rapport Base/Hauteur, où Base est la distance entre les centres optiques des appareils photographiques et Hauteur est la hauteur de vol. Le ratio B/H indique l’angle d’intersection entre les rayons homologues. Plus le ratio est grand et plus l’angle d’intersection est obtus, ce qui produit un meilleur ajustement (Héno, 2008). Pour la DLT, un ratio similaire : Base/Distance à la scène joue sûrement un rôle sur la précision. Cependant, si le nombre d’appareils photographiques est supérieur à 2, la Base et la Distance à la scène sont difficilement définies. En outre, plus ce ratio est élevé, plus la différence entre pixels homologues s’accroît, ce qui rend difficile la détection automatique de ceux-ci.

Concernant les deux premières conditions, on peut calculer la distance d théorique entre le point de vue et la scène. Une focale f minimum permet d’être le plus proche de la scène tout en la photographiant avec netteté dans son entièreté. Connaissant la taille du capteur ($2L \times 2l$), on peut calculer le demi-angle de vue de la caméra, α .

$$\tan \alpha = \frac{L}{f}$$

Si $2x$ par $2y$ est l’estimation de la dimension de la scène selon l’angle du point de vue, par la relation des triangles semblables (*figure 17*),

$$d = \frac{x}{\tan \alpha}$$

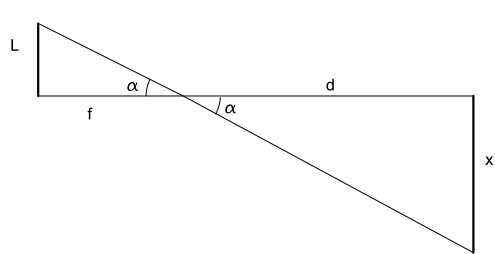


Figure 17 - Géométrie d’une prise de vue (triangles semblables)

Pour le cas qui nous concerne, les données et résultats sont résumés dans le *tableau 3*.

Tableau 3 - Détermination de la distance appareils photo - scène minimale.

Focale minimum f	16 mm
--------------------	-------

Dimension du capteur (2L par 2l)	23,5 x 15,6 mm
Estimation de la taille de la scène (2x par 2y)	200 par 150 mm
<i>d</i>	135 mm ou 155 mm

Si seule la distance *d* maximale est considérée, l’appareil doit se situer théoriquement à une quinzaine de centimètres de la scène. En pratique, bien sûr, il est bien plus efficace d’utiliser le viseur de l’appareil photo.

Techniques photographiques

Résumons les caractéristiques du dispositif de prise de vue. La scène est bien éclairée, immobile, de petite taille et l’appareil photo est utilisé sans trépied.

L’appareil photo est réglé en mode automatique pour une mise au point parfaite de la scène et une qualité d’image idéale. En effet, les modules de réglages des appareils photographiques numériques actuels sont très performants.

Les caractéristiques de sensibilité, d’ouverture de diaphragme et de vitesse de l’obturateur sont résumées dans le *tableau 4*.

Tableau 4 - Caractéristiques techniques des prises de vues.

Clichés	Iso	focale (mm)	Ouverture	Vitesse (s)
LegoL	100	16	f/4,0	1/60
LegoC	100	16	f/4,0	1/60
LecoR	125	16	f/5,0	1/80

Notre priorité est d’obtenir une image dans laquelle la maquette est projetée sur le plus de pixels possible. Il faut dès lors utiliser la focale la plus petite disponible et se rapprocher au maximum de la maquette.

La profondeur de champ, c’est-à-dire la distance comprise entre l’objet le plus proche et le plus éloigné considérés comme nets est notre second objet d’intérêt. La profondeur de champ est influencée par trois éléments :

- Plus le diaphragme est fermé, plus la profondeur de champ est grande.
- Plus l’objet est éloigné, plus la profondeur de champ est grande
- Plus la focale est courte, plus la profondeur de champ est grande.

Dès lors le diaphragme est fermé le plus possible. Il doit cependant rester assez ouvert pour laisser entrer suffisamment de lumière sous peine d’obtenir un cliché trop sombre. La solution est un laps de temps d’ouverture plus important, en diminuant la vitesse d’obturation. Cependant, en augmentant la vitesse d’obturation, les clichés peuvent être victime de flous de bougé. Dans notre cas, ce qui est susceptible de bouger n’est pas la maquette mais le photographe.

Pour éviter ce problème, il faut veiller à ce que la scène soit la mieux éclairée possible. Ceci aura trois effets :

- Une vitesse d’obturation plus rapide est possible, elle permet d’éviter les flous de bougé
- Une ouverture de diaphragme plus faible pour obtenir une profondeur de champ plus élevée
- Une sensibilité du capteur faible (ISO100), proche de sa valeur nominale pour laquelle aucune amplification n’est nécessaire ; Une amplification du signal engendre un bruit numérique qui dégrade la qualité de la photo.

L’objectif du NEX-6 est connu pour affecter les images de distorsions radiales importantes. Cependant, un module interne permet de les corriger. Pour l’expérience, celui-ci est désactivé.

Les fichiers-images sont exportés en jpg, avec la qualité la plus fine. L’utilisation des fichiers bruts (RAW) aurait été préférée mais ce format d’image est difficilement supporté par certains logiciels utilisés (XnView).

Aucune retouche de contraste ou d’exposition n’a été effectuée, la qualité des photos étant jugée suffisamment correcte.

Une bonne qualité des photographies aboutira à une digitalisation précise des PC et PV, élément crucial pour la suite des opérations, c’est pourquoi cette étape doit être traitée avec grand soin. Les photos sont le point de départ de toute la chaîne de restitution.

Les trois clichés de la maquette Lego sont nommés LegoL (Left), LegoC (centre) et LegoR (right) (*figure 18*).

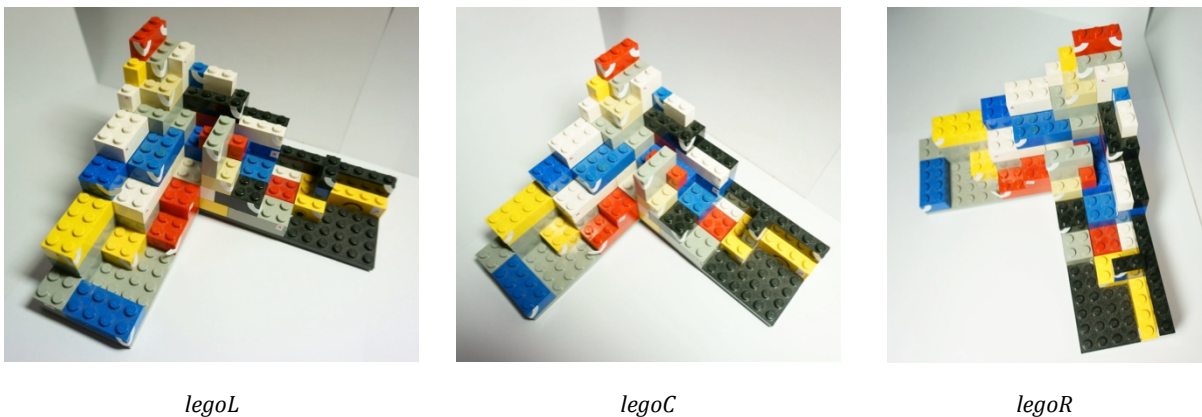


Figure 18 - Prises de vue de la maquette Lego.

Les trois points de vue correspondant aux clichés sont illustrés à la *figure 19*. La sphère verte correspond à LegoL, la bleue à LegoC et la rouge à LegoR. Les gerbes de rayons perspectifs issues des points de calibration y sont représentées.

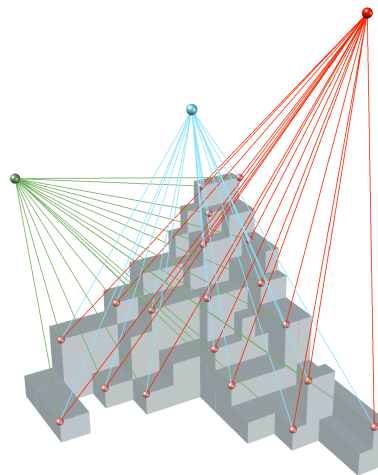


Figure 19 - Positions des prises de vues et gerbes de rayons perspectifs.

6.2.4. Détermination des coordonnées-images (digitalisation)

La digitalisation est l’étape de collecte des coordonnées-images (u, v) des PV et PC, exprimées en pixels.

Avec des logiciels tels que XnView ou encore Idrisi, la position (u, v) d’un pixel de l’image est renseignée lorsqu’il est interrogé via un curseur dédié. De manière conventionnelle, l’origine du référentiel-image est située en haut à gauche de l’image. Les coordonnées selon l’axe vertical V sont comptées positivement vers le bas, les coordonnées selon l’axe horizontal U sont comptées positivement vers la droite. La *figure 20* schématise une image et son référentiel. En fait, une image est un tableau (ou une matrice) dont la dimension est la taille de l’image. A chacun des pixels correspond une cellule de la matrice. Ainsi, par exemple le premier pixel noté a a pour coordonnées $(0, 0)$ et le pixel b a pour coordonnées $(9, 6)$. Notons toutefois qu’avec des logiciels permettant l’utilisation de matrices (comme MATLAB), la première cellule d’une matrice a pour coordonnées $(1,1)$.

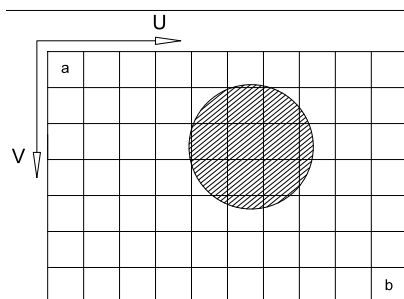


Figure 20 - Schématisation d'une image et de son référentiel.

Lorsqu’un cliché est acquis, une cible représentant un PC ou un PV, est projetée dans l’image par l’intermédiaire du centre optique de l’appareil photo sur le plan image. Le cas idéal mais utopique serait que la cible soit projetée dans un seul pixel. Ce cas est bien entendu irréalisable puisque la cible devrait être petite (en fonction de la résolution de l’image), mais devrait aussi varier en fonction de la distance et de l’angle de projection. En effet, la projection centrale implique une déformation de tout objet projeté en fonction de l’écartement de celui-ci par rapport à l’axe optique mais aussi par rapport à la distance centre optique-objet.

Un cas plus réaliste est de déterminer le centre de la projection d’une cible circulaire. Or, comme le montre la *figure 20*, l’identification exacte du centre de la projection de la cible est presque impossible puisque les pixels sont des valeurs discrètes de luminance. De plus, à cause de la projection centrale, des cibles sphériques seront inévitablement projetées en ovoïde.

Une solution séduisante est l’utilisation d’un algorithme détectant le centroïde de la projection ovoïde. Cette solution est théoriquement envisageable pour une cible bien contrastée par rapport à son support.

Une autre possibilité envisageable serait l’utilisation de cibles sphériques dont le rayon est connu. En effet, la projection d’une sphère sur un plan est un cercle.

Toutes ces considérations sont très théoriques. Il convient de considérer un équilibre entre la précision engendrée et la mise en pratique. Ainsi, deux considérations sont réellement importantes :

- la facilité avec laquelle la cible est repérée sur la photo (car des cibles trop petites ou mal contrastées par rapport à leur support sont difficilement identifiables et peuvent conduire à une perte de temps ou des erreurs de confusion) ;
- la taille de la cible est liée à la taille de l’objet à restituer ainsi que la distance entre la cible et l’appareil photo.

Un exemple de cible apparemment idéale en pratique est illustré à la *figure 21* :

- Le noir et le blanc permettent un bon contraste par rapport au support de la scène ;
- elle est suffisamment grande pour être rapidement identifiée (elle doit être mise à l’échelle en fonction de la taille de la scène) ;
- elle présente un centre circulaire de faible dimension qui permet de détecter son centre rapidement et relativement précisément.

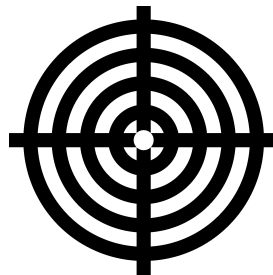


Figure 21 - Cible idéale.

Spécifiquement à l’expérience sur la maquette de « Lego », les coins des pièces jouent le rôle de cible. L’utilisation de ceux-ci :

- permet une digitalisation précise (le coin est théoriquement un point) ;
- facilite l’obtention des coordonnées-mondes ;
- a l’avantage d’être détectable depuis des points de vue différents.

Pour avoir un ordre de grandeur, 5 pixels représentent moins d’1/10^{ème} mm pour les clichés effectués. Dès lors une erreur de cet ordre de grandeur dans la digitalisation est considérée comme négligeable. Des considérations plus abouties en matière de gestion des erreurs seront fournies pour l’expérience sur la retenue d’eau.

Les produits de la digitalisation des 19 PC et 9 PV pour chacune des 3 images sont stockés dans des tableaux au format .xlsx. Ils sont présentés en *annexe numérique*.

6.3. CALIBRATION DES CLICHES

Rappelons que la calibration d’un cliché a pour but d’obtenir 11 paramètres modélisant la prise de vue à travers :

- les caractéristiques intrinsèques de la caméra (focale, position du point principal)
- les caractéristiques extrinsèques de la caméra (position du point de vue, orientations de la caméra).

Rappelons aussi, que trois éléments sont indispensables pour la réalisation de la calibration :

- les coordonnées-mondes d’un minimum de 6 points de calibration.
- les coordonnées-images de ces mêmes points de calibration
- un algorithme dont les produits sont les 11 paramètres ainsi qu’un système d’évaluation de la qualité de la modélisation.

Les deux premiers éléments sont acquis, le troisième est traité dans cette section.

L’algorithme de la DLT développé est pour le moment très simple. Il ne fait que traduire les équations [12] en langage de programmation. Il sera étoffé au fur et à mesure des enseignements acquis. Ce premier programme porte le nom de *Calibration_DLT_11p*.

Calibration_DLT_11p (appliqué ici à la photo *legoC*) est organisé en 4 sections distinctes listées et présentées ci-dessous :

- chargement des données ;
- construction des matrices et résolution par moindres carrés ;
- calcul des résidus du modèle ;
- exportation des résultats.

Chargement des données

Dans cette première partie, les coordonnées-mondes et images des PC sont importées via la fonction *xlsread()*. Les fichiers d’entrée portent l’extension .xlsx (format Excel) et sont organisés comme suit :

	A	B	C
1	X_{PC1}	Y_{PC1}	Z_{PC1}
2	X_{PC2}	Y_{PC2}	Z_{PC2}
.	.	.	.
n	X_{PCn}	Y_{PCn}	Z_{PCn}

	A	B
1	$U_{PC1-photo1}$	$V_{PC1-photo1}$
2	$U_{PC2-photo1}$	$V_{PC2-photo1}$
.	.	.
n	$U_{PCn-photo1}$	$V_{PCn-photo1}$

```
%Importation du .xlsx des coordonnées_monde.
com=xlsread('coo_monde_PC_lego.xlsx')
```



```
%Importation du .xlsx des coordonnées_image.
coi=xlsread('coo_im_PC_legoC.xlsx')
sizept= length(com);
```

Le nombre de PC stockés dans les fichiers d’entrée est obtenu via la fonction *length()*.

Implémentation des matrices et résolution par moindres carrés

Les matrices A et B des équations sont construites en accord avec les équations [12] via diverses fonctions de permutation, de rotation d’éléments de matrice (*reshape()*, *flipud()*, *rot90()*).

En outre, la résolution du système par la méthode des moindres carrés respecte les conclusions de la *section 4.2.2.2*. La décomposition QR de la matrice A t effectuée via la fonction *qr()* et la résolution par substitution à rebours utilise la fonction *backsub()*.

```
%Allocation de la mémoire
L=zeros(11,1)
B=zeros(2*sizept,1)
A=zeros(2*sizept,11)

%Construction de la matrice B.
B=reshape(flipud(rot90(coi)),numel(coi),1)

%Construction de la matrice A
for i=1:sizept
    A(2*i-1,1:3)=com(i,1:3);
    A(2*i,5:7)=com(i,1:3);
    A(2*i-1,4)=1;
    A(2*i,8)=1;
    A(2*i-1,9:11)=com(i,1:3).*-coi(i,1);
    A(2*i,9:11)=com(i,1:3).*-coi(i,2);
End

%Résolution par QR décomposition et substitution à rebours
[Q,triR]=qr(A,0);
temp=Q'*B;
L=backsub(triR,temp);
```

Calcul des résidus du modèle

En accord avec les équations [13] et [14], les résidus par point de calibration selon *u* et *v* et la RMSE sont calculés.

```
%Allocation de la mémoire
ResiduU=zeros(sizept,1)
ResiduV=zeros(sizept,1)
Residu=zeros(sizept,1)

for i=1:sizept

ResiduU(i,1)=coi(i,1)-
((L(1,1)*com(i,1)+L(2,1)*com(i,2)+L(3,1)*com(i,3)+L(4,1))/...
(L(9,1)*com(i,1)+L(10,1)*com(i,2)+L(11,1)*com(i,3)+1));

ResiduV(i,1)=coi(i,2)-
((L(5,1)*com(i,1)+L(6,1)*com(i,2)+L(7,1)*com(i,3)+L(8,1))/...
(L(9,1)*com(i,1)+L(10,1)*com(i,2)+L(11,1)*com(i,3)+1));
```

```

(L(9,1)*com(i,1)+L(10,1)*com(i,2)+L(11,1)*com(i,3)+1));
Residu(i,1)=(ResiduU(i,1).^2+ResiduV(i,1).^2)^0.5;
end
RMSE=sum(Residu(:,1))/sizept;

```

Détermination de grandeur physique (position de la caméra).

Comme nous l’avons déjà précisé, il est difficile d’interpréter directement les paramètres L. Il est par contre possible de les exploiter afin d’obtenir les coordonnées-mondes du centre de projection de la caméra. Le fragment de script ci-dessous a cet objectif, en appliquant les équations [15] et en s’assurant que la matrice composée des paramètres L est inversible (dont le déterminant est non nul). L’analyse des résultats de paramètres physiques est une démarche importante avec ce type d’algorithme notamment pour vérifier que la solution est dans une gamme de valeurs plausibles.

```

%Camera Position
N=[L(1) L(2) L(3);L(5) L(6) L(7);L(9) L(10) L(11)];
detN=det(N) %Vérifier si N n’est pas singulière
N=inv(N)
A=[-L(4);-L(8);-1];
posiCam=N*A

```

Exportation des L

Enfin, les 11 paramètres L obtenus sont exportés dans un fichier .csv via la fonction `csvwritet()`.

```

%Exportation des L
filenameL='legoC_L.csv';
exportL=csvwrite(filenameL,L);

```

Cet algorithme de calibration est aussi appliqué aux deux autres clichés, legoL et legoR.

Le *tableau 5* résume les produits de l’algorithme *calibration_DLT-11p* pour chacun des 3 clichés. Ils présentent les 11 paramètres, les RMSE (en pixels) ainsi que les coordonnées-mondes des centres optiques (en mm).

Tableau 5 -Résultats de la calibration.

Caméra	legoL	legoC	legoR
L1	-11,14	-12,36	-12,53
L2	9,67	6,31	-1,50
L3	-7,35	-7,66	-8,44
L4	2082,84	2103,07	2662,26
L5	5,40	5,64	2,15
L6	2,47	5,07	8,91

L7	-13,44	-11,93	-10,41
L8	1165,63	1165,86	925,51
L9	-0,0025	-0,0016	-0,0000
L10	-0,0010	-0,0014	-0,0015
L11	-0,0032	-0,0031	-0,0033
RMSE (pixels)	12,3	8,1	7,4
X_c (mm)	153	109	38
Y_c (mm)	86	131	157
Z_c (mm)	164	205	231

On observe une valeur des 11 paramètres L d’ordre de grandeurs très différents l’un par rapport à l’autre mais relativement cohérents d’un cliché à l’autre.

La RMSE est un bon indicateur de la qualité de la modélisation. Il est de l’ordre de dix pixels pour les trois clichés, ce qui, à priori, prouverait la bonne qualité de l’algorithme et de son implémentation.

Une autre façon, plus concrète encore de vérifier l’efficacité de l’algorithme est l’analyse des positions des centres de vue. Celles-ci sont représentées sur la *figure 19* et semblent correspondre à la réalité. Cependant, il est impossible d’en être absolument certain puisque leurs positions n’ont pas été mesurées lors de l’expérience.

Dans la quête de l’amélioration de l’algorithme, bien que les résultats semblent cohérents, les résidus en U et en V par PC pour le cliché LegoL sont reportés au graphe suivant (*figure 22*).

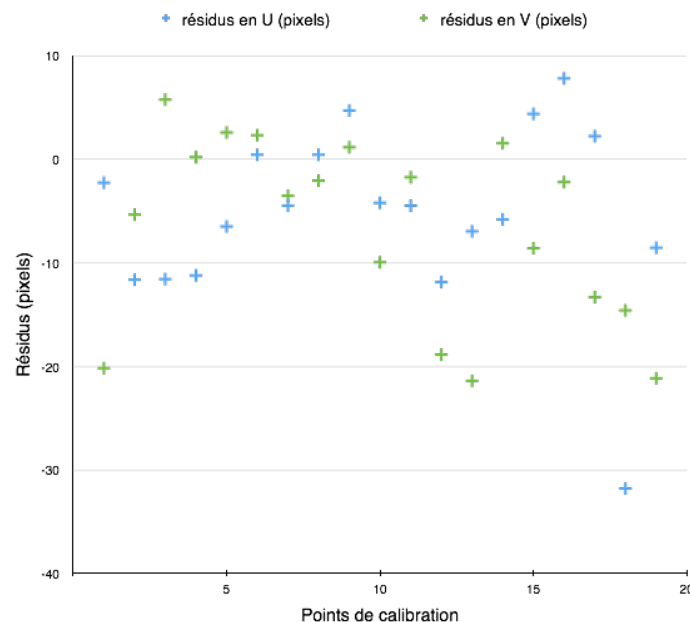


Figure 22 - Résidus en u et en v de la calibration (LegoL)

Leur distribution est asymétrique par rapport à zéro, ce qui indique un biais, laissant présager une erreur systématique présente dans la modélisation.

Un autre indicateur est imaginé pour poursuivre l’analyse de la calibration. Il combine les résidus en U et en V pour chaque PC, comme s’il s’agissait en quelque sorte d’un résidu planimétrique par PC. Cet indice, appelé *Résidu Global de Calibration (RGC)* est exprimé en pixels et est calculé selon :

$$RGC_i = \sqrt{\varepsilon_{u_i}^2 + \varepsilon_{v_i}^2} \quad [18]$$

Les RGC obtenus pour chacun des 19 PC pour l’image *LegoL* sont répertoriés dans le *tableau 6*.

Tableau 6 - Résidus globaux (pixels) - LegoL

PC	Résidus globaux	PC	Résidus globaux
1	20,3	12	22,3
2	12,8	13	22,5
3	12,9	14	6,0
4	11,2	15	9,7
5	7,0	16	8,1
6	2,4	17	13,5
7	5,7	18	35,0
8	2,1	19	22,8
9	4,9	Max	35,0
10	10,8	Min	2,1
11	4,8	RMSE	12,3

Une analyse de ces RGC est effectuée en classant les PC par rapport à leur écart au centre de l’image. Les résultats sont présentés sous forme graphique à la *figure 23*.

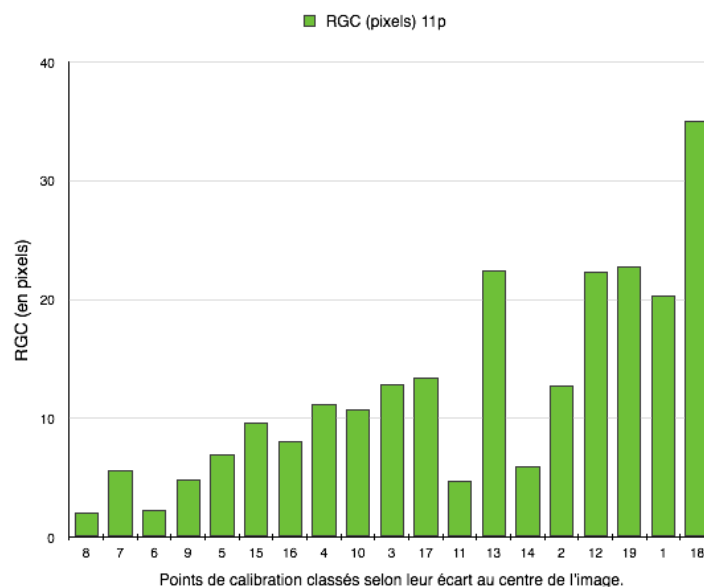


Figure 23 - RGC (pixels) par PC, classés selon leur écart par rapport au centre de l'image (LegoL)

Visuellement, ce graphique indique une augmentation de la valeur des résidus globaux sur les points de calibration en fonction de leur écart par rapport au centre de l’image. Une telle observation est probablement due à un élément important jusqu’alors négligé dans l’algorithme : la distorsion induite par l’optique de l’appareil photo. L’analyse des deux autres clichés montre ce même problème de distorsion. Voici donc un premier élément d’amélioration de l’algorithme: la prise en compte dans l’algorithme des distorsions optiques.

6.4. RESTITUTION DE LA SCENE

La restitution vise à déterminer la position tridimensionnelle un objet dont les coordonnées-images sont connues dans au moins deux images. A ce stade, le but n’est pas de restituer la scène entière mais plutôt de juger la performance du programme. Ainsi, seuls les 9 PV dont on connaît non seulement les coordonnées-images dans les trois clichés, mais aussi leurs coordonnées-mondes sont restitués.

Comme pour le programme de calibration, le programme de restitution baptisé *Restitution_DLT_11p* ne fait que traduire sous MATLAB, les équations [15]. Celui-ci, dans sa version la plus simple est composé de 4 parties :

- Importation des données ;
- restitution ;
- calcul des résidus ;
- exportation.

Les 11 paramètres L_i des trois caméras obtenus à l’étape précédente, ainsi que les coordonnées-images des points à restituer (PV) sont importés. En outre, le nombre de caméras et de points à restituer sont demandés.

```

%% Importation des données

nCam=3           %nombre de caméras
nHo=9           %nombre de points homologues maximum

%Paramètres L
L=zeros(16,1,nCam);
L(:,1,1)=csvread('LegoL_L.csv');
L(:,1,2)=csvread('LegoC_L.csv');
L(:,1,3)=csvread('LegoR_L.csv');

%Points homologues (les PV pour le moment)
hom=zeros(nHo,2,nCam);
hom(:, :, 1)=xlsread('LegoL_PV.xlsx');
hom(:, :, 2)=xlsread('LegoC_PV.xlsx');
hom(:, :, 3)=xlsread('LegoR_PV.xlsx');

%Coordonnées monde des GCP pour la vérification.
GCPmonde=xlsread('Lego_PV_monde.xlsx');
    
```

Les matrices correspondant aux systèmes d’équations [15] sont construites à l’aide des différents éléments importés et le système est résolu par la méthode des moindres carrés. Cette résolution aboutit à la détermination des coordonnées (x, y, z) des points à restituer.

```

xyz=zeros(1:nHo,1:3);
for i=1:nHo
    cdx=1:nCam
    A=[]
    B=[]
    A(1:2:nCam*2,1)=hom(i,cdx*2-1).*L(9,cdx)-L(1,cdx)
    A(1:2:nCam*2,2)=hom(i,cdx*2-1).*L(10,cdx)-L(2,cdx)
    A(1:2:nCam*2,3)=hom(i,cdx*2-1).*L(11,cdx)-L(3,cdx)
    A(2:2:nCam*2,1)=hom(i,cdx*2).*L(9,cdx)-L(5,cdx)
    A(2:2:nCam*2,2)=hom(i,cdx*2).*L(10,cdx)-L(6,cdx)
    A(2:2:nCam*2,3)=hom(i,cdx*2).*L(11,cdx)-L(7,cdx)
    B(1:2:nCam*2,1)=L(4,cdx)-hom(i,cdx*2-1)
    B(2:2:nCam*2,1)=L(8,cdx)-hom(i,cdx*2)

[Q,triR]=qr(A,0);
temp=Q'*B;
xyz(i,1:3)=backsub(triR,temp);
end

```

Ensuite, les coordonnées des PV restituées par le programme sont comparées aux coordonnées-mondes mesurées sur la maquette. Les résidus en X, Y et Z par PV sont calculés ainsi que la RMSE en accord avec [16] et [17].

```

%% Résidus
ErrorX=xyz(:,1)-GCPmonde(:,1);
ErrorY=xyz(:,2)-GCPmonde(:,2);
ErrorZ=xyz(:,3)-GCPmonde(:,3);
RMSE=(sum((ErrorX.^2+ErrorY.^2+ErrorZ.^2).^0.5))/nHo;

```

Enfin, un tableau reprenant les x, y et z des points restitués est exporté en .csv. Ce format permet d’importer le nuage de point restitué dans la plupart des logiciels de Dessins Assistés par Ordinateur (DAO) afin de le visualiser.

```

exportXYZ=xlswrite('XYZ.csv',xyz);

```

Le programme *Restitution_DLT_11p* est appliqué à 4 combinaisons possibles de prises de vue :

- 1) legoL + legoR, configuration dont l’écartement entre prises de vue est maximal (150 mm);
- 2) legoC+ legoR, configuration associée à l’écartement un intermédiaire (80 mm);
- 3) legoL + legoC, configuration associée à l’écartement minimal (75 mm);
- 4) legoL + legoC + legoR, configuration à trois prises de vue.

Les résultats de *Restitution_DLT_11p* pour chacune de ces configurations sont présentés dans le *tableau 7*. L’indice employé, appelé « résidu global de restitution » (RGR) (exprimé en mm) est formulé de la manière suivante pour le *i*^{ème} PV:

$$RGR_i = \sqrt{\varepsilon_{x_i}^2 + \varepsilon_{y_i}^2 + \varepsilon_{z_i}^2} \quad [19]$$

Il représente l’écart entre la position mesurée et la position calculée de PV.

Tableau 7 – RGR et RMSE de la restitution.

	L + R	C + R	C + L	C + L + R
A	1,4	3,3	5,5	1,6
B	0,7	0,2	1,3	0,7
C	0,7	0,3	1,1	0,7
D	0,6	0,5	0,7	0,6
E	0,1	0,2	0,2	0,1
F	0,5	0,2	0,6	0,4
G	0,8	0,6	0,9	0,8
H	0,8	0,9	0,8	0,8
I	2,2	2,9	1,7	2,0
RMSE (mm)	0,9	1,0	1,4	0,9
Ecart -type (mm)	0,6	1,2	1,6	0,6

La première observation d’importance est que les RMSE sont relativement faibles, de l’ordre du millimètre, ce qui témoigne d’une performance de l’algorithme et d’une implémentation correctes.

Suivant le nombre et les caméras utilisées, les RMSE sur les PV varient légèrement. Les configurations obtenant les meilleurs résultats sont L + R et L + C + R. Ces configurations ont en commun la prise en compte des prises de vue les plus écartées. L’explication de ce phénomène est peut être du au fait que lorsque les clichés sont plus écartés l’un de l’autre, et que donc le ratio Base/distance à la scène augmente, les rayons perspectifs s’intersectent selon un angle plus obtus, ce qui produit à un meilleur ajustement (Héno, 2008).

Les deux autres configurations présentent un résidu global de restitution pour le PV A relativement plus important que les autres PV, qui implique une augmentation du RMSE. Ceci peut être expliqué par une erreur de digitalisation de PV A dans le cliché C.

La *figure 24* représente les résidus globaux de restitution obtenus (en mm) par PV pour la configuration à trois prises de vue.

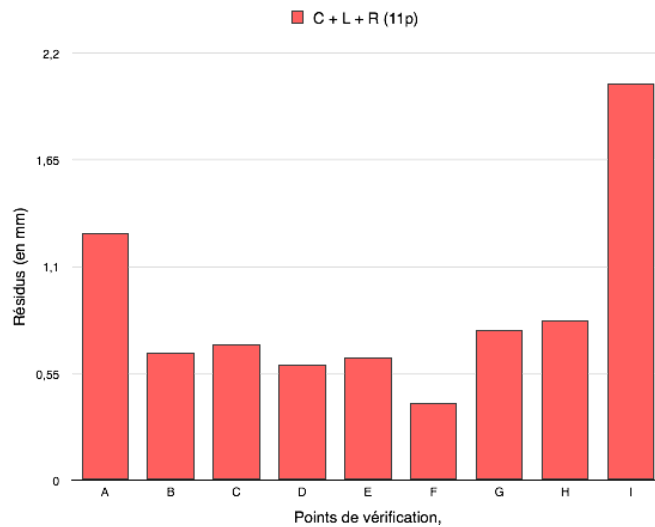


Figure 24 - RGR par PV (en mm) - configuration L +C +R)

Les PV A et I présentent des résidus globaux les plus élevés. Ces deux points sont situés en bord de cliché (figure 18) mais aussi en dehors de la zone de calibration (figure 15). Il est donc peu aisé d’expliquer quel effet, entre les distorsions optiques et la restitution dans une zone non calibrée engendre ces valeurs plus élevées. Une analyse plus poussée sera effectuée lorsqu’une modélisation des distorsions aura été intégrée.

6.5. ENSEIGNEMENT DE L’APPLICATION DE LA DLT A 11 PARAMETRES

Nous concluons cette section tirant certains enseignements afin d’améliorer la qualité de l’algorithme et de sa mise en œuvre.

Le programme MATLAB développé semble performant et efficace. La DLT restitue les PV avec une erreur moyenne inférieure à un millimètre lorsque trois prises sont utilisées. Cependant, une erreur systématique a été repérée, surtout lors de la calibration. En effet, plus les point sont éloignés du centre de l’image plus les résidus augmentent. Ce phénomène systématique est expliqué par la distorsion engendrée par les systèmes optiques des caméras (Florou et Mohr, 1996).

Le protocole d’acquisition de données et de distribution spatiale des PC respectant les recommandations de la littérature semble lui aussi adéquat. Une amélioration pourrait consister à mesurer les positions des prises de vue dans l’espace afin de les comparer quantitativement à celles obtenues par l’algorithme. En pratique, il est impossible de mesurer la position exacte du centre optique de la caméra puisqu’il est à l’intérieur de l’objectif, inaccessible aux mesures. Une valeur approchée pourra être déterminée.

Dans la suite du travail, nous nous concentrerons sur la modélisation des distorsions optiques. Il semble en effet que cet élément est la cause majeure d’erreurs systématiques et qu’il serait donc possible de les éviter.

7. THEORIE DE LA DLT A 16 PARAMETRES

7.1. INTEGRATION DE LA MODELISATION DES DISTORSIONS OPTIQUES

Les distorsions radiales et tangentielles (*figure 25*) produites par l’objectif impliquent des erreurs systématiques qu’il est possible de modéliser. Cette modélisation des distorsions optiques est intégrée à la DLT.

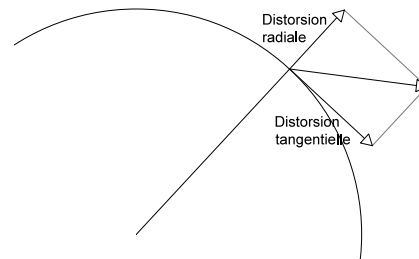


Figure 25 - Distorsion radiale et tangentielle

En l’absence de distorsion, la relation entre un point (x, y, z) dans le référentiel-monde et son correspondant dans l’image (u, v) est exprimée par les équations fondamentales de la DLT [8]. Ces équations sont basées sur la condition de colinéarité. En effet, le point (u, v) , le centre de projection de l’appareil photo ainsi que le point du monde (x, y, z) sont situés sur une même droite (Chen et al., 1994).

Les distorsions optiques des appareils photos impliqueront que le point image aura à une position légèrement différente de celle attendue par la condition de colinéarité. L’écart obtenu en colonnes dans l’image est noté Δu et l’écart obtenu en lignes dans l’image est noté Δv (*figure 26*) (Chen, 1997).

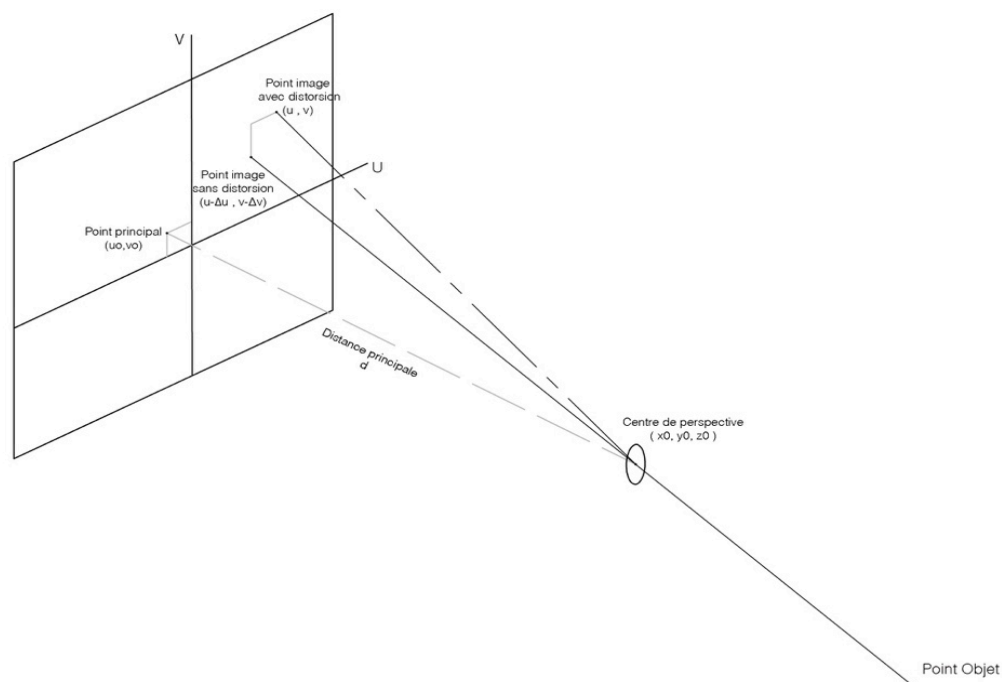


Figure 26 - Géométrie d’une image et distorsions (inspiré de Chen, 1994)

Si ces deux composantes de distorsion radiale et tangentielle sont appliquées aux équations fondamentales de la DLT [8], on obtient :

$$\begin{aligned} u - \Delta u &= \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \\ v - \Delta v &= \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \end{aligned} \quad [20]$$

Selon Brown (1972), les distorsions peuvent être modélisées par 5 paramètres. Les équations de ces deux composantes prennent ainsi la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}(r^2 + 2\xi^2) + L_{16}\xi\eta \\ \Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \end{aligned} \quad [21]$$

Où,

- les L_1 à L_{11} sont les coefficients de la DLT ;
- L_{12} , L_{13} et L_{14} sont les paramètres de la modélisation des distorsions radiales, de nature symétrique ;
- L_{15} et L_{16} sont les paramètres des distorsions tangentielles.

et,

$$\begin{aligned} [\xi, \eta] &= [u - u_0, v - v_0] \\ r^2 &= \xi^2 + \eta^2 \end{aligned} \quad [22]$$

[22] correspond à la translation du référentiel-image dont l’origine est désormais le point principal et r la distance par rapport à la nouvelle origine du référentiel.

Il est possible dans la résolution du problème de prendre en compte ou non chacun de ces termes de distorsions. (Florou and Mohr, 1996; Kwon, 1998) Les cas envisageables sont :

- DLT à 16 paramètres si tous les paramètres de distorsions sont estimés.
- DLT à 14 paramètres si seul le premier paramètre de distorsions radiales ainsi que les paramètres de distorsions tangentielles sont estimés.
- DLT à 12 paramètres si seul le premier paramètre de distorsions radiales est estimé.
- DLT à 11 paramètres si aucun terme de distorsion n’est pris en compte.

En fonction du nombre de paramètres de distorsions assimilés dans le système, un nombre minimum de PC sera indispensable à la résolution du système afin qu’il soit au minimum déterminé (Laplanche et al., 2008). Le *tableau 8* résume ce nombre minimum de PC en fonction du nombre de paramètres pris en compte dans la modélisation.

Tableau 8 - Nombre minimum de paramètres en fonction du degré de modélisation des distorsions optiques

Nombre de paramètres	Nombre minimum de points de calibration
11	6

12	6
14	7
16	8

7.2. FORMULATION DES EQUATIONS DE CALIBRATION

Les développements suivants sont très largement inspirés de Kwon (1998). En réarrangeant les équations fondamentales améliorées de la DLT [20] :

$$\begin{aligned} \frac{1}{R}u &= \frac{1}{R}(L_1x + L_2y + L_3z + L_4 - L_9xu + L_{10}yu + L_{11}zu) + \Delta u \\ \frac{1}{R}v &= \frac{1}{R}(L_5x + L_6y + L_7z + L_8 - L_9xv + L_{10}yv + L_{11}zv) + \Delta v \end{aligned} \quad [22]$$

Avec,

$$R = L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1 \quad [23]$$

Sous forme matricielle, [22] donne :

$$\frac{1}{R} \begin{pmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz & \xi r^2 R & \xi r^4 R & \xi r^6 R & (r^2 + 2\xi^2)R & \xi \eta R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz & \eta r^2 R & \eta r^4 R & \eta r^6 R & \xi \eta R & (r^2 + 2\eta^2)R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \cdot \\ L_{14} \\ L_{15} \\ L_{16} \end{pmatrix} =$$

Pour chacun des PC dont les coordonnées sont connues tant dans l’image que dans le monde, on obtient deux équations avec 16 inconnues, les 16 paramètres de la DLT modélisant le dispositif de prise de vue avec prise en compte des distorsions optiques. Dès lors un minimum de 8 points est nécessaire à la résolution du système (32 équations pour 16 inconnues).

Pour $n \geq 8$ le système d’équations sous forme matriciel s’écrit :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 & \xi r^2 R & \xi r^4 R & \xi r^6 R & (r^2 + 2\xi^2)R & \xi \eta R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 & \eta r^2 R & \eta r^4 R & \eta r^6 R & \xi \eta R & (r^2 + 2\eta^2)R \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n & \xi r^2 R & \xi r^4 R & \xi r^6 R & (r^2 + 2\xi^2)R & \xi \eta R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n & \eta r^2 R & \eta r^4 R & \eta r^6 R & \xi \eta R & (r^2 + 2\eta^2)R \end{pmatrix}}_{[2n \times 16]} \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \cdot \\ L_{14} \\ L_{15} \\ L_{16} \end{pmatrix} =$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ \cdot \\ L_{14} \\ L_{15} \\ L_{16} \end{pmatrix}}_{[16 \times 1]} = \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \cdot \\ u_n \\ v_n \\ b \end{pmatrix}}_{[2n \times 1]}$$

[24]

La prise en compte des distorsions implique que les équations ne sont plus linéaires (Florou and Mohr, 1996). Une méthode de résolution itérative de ces équations non linéaires est décrite par Kwon (1998). Les matrices A et b contiennent R qui est fonction des paramètres L_9 à L_{11} . Pour cette raison, une méthode itérative est employée :

- a) Pour la première itération, il est impossible de déterminer L_9 à L_{11} . La position du point principal n’est donc pas disponible non plus. Ainsi, pour la première itération, l’équation fondamentale de la DLT est résolue (à 11 paramètres). Les paramètres L_9 à L_{11} sont obtenus. Ceci permet de calculer R [23] et de déterminer la position du point principal.

A partir de [9], on peut obtenir la position du point principal comme suit:

$$L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 = \frac{1}{D^2} (r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2) = \frac{1}{D^2}$$

La dernière expression est autorisée si la matrice de transformation [2] est orthogonale.

Dès lors,

$$D^2 = \frac{1}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

D’autre part,

$$(DL_1)(DL_9) + (DL_2)(DL_{10}) + (DL_3)(DL_{11}) = u_0(r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2) - d_u = u_0$$

$$(DL_5)(DL_9) + (DL_6)(DL_{10}) + (DL_7)(DL_{11}) = v_0$$

Donc,

$$u_0 = D^2(L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}) = \frac{(L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11})}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

$$v_0 = D^2(L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}) = \frac{(L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11})}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

Il faut noter toutefois que le calcul des paramètres par les moindres carrés, ne garantit pas l’orthogonalité de la matrice de transformation due aux erreurs expérimentales (Kwon, 1998). Ceci constitue une limite à la DLT telle qu’elle est formulée ci-dessus. Il existe une version modifiée de la DLT qui prend en compte cet éventuel problème (Hatze,

1988). Il faudrait la considérer si les précisions obtenues avec la formulation adoptée ne sont pas suffisantes.

Une fois la position du point principal calculée, on peut déterminer [22]. Il en découle l’obtention de [21] ce qui permet enfin de résoudre [24] par la même méthode d’ajustement par moindres carrés décrite dans la *section 4.2.2.2*.

b) Cette procédure est réitérée jusqu’à ce que les coefficients L_i convergent.

La procédure d’estimation de la qualité de la calibration est semblable à celle employée lors de la calibration à 11 paramètres. Elle intègre en plus les erreurs de distorsions optiques. Les résidus sur la position en colonnes et en lignes sont donnés par :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{u_i} &= u_i - \Delta u_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1} \\ \varepsilon_{v_i} &= v_i - \Delta v_i - \frac{L_1 x_i + L_2 y_i + L_3 z_i + L_4}{L_9 x_i + L_{10} y_i + L_{11} z_i + 1}\end{aligned}\quad [25]$$

La RMSE associée à la calibration est calculée selon [14].

7.3. FORMULATION DES EQUATIONS DE RESTITUTION

La phase de restitution est, elle aussi, modifiée pour intégrer la modélisation des distorsions optiques. Le développement théorique des équations de restitution est présenté dans cette section.

On peut réarranger [20] en mettant en évidence x, y et z .

$$\begin{aligned}(\mu L_9 - L_1)x + (\mu L_{10} - L_2)y + (\mu L_{11} - L_3)z &= (L_4 - \mu) \\ (\omega L_9 - L_5)x + (\omega L_{10} - L_6)y + (\omega L_{11} - L_7)z &= (L_8 - \omega)\end{aligned}\quad [26]$$

Avec,

$$[\mu, \omega] = [u - \Delta u, v - \Delta v]$$

On peut exprimer [26] matriciellement,

$$\begin{pmatrix} \mu L_9 - L_1 & \mu L_{10} - L_2 & \mu L_{11} - L_3 \\ \omega L_9 - L_5 & \omega L_{10} - L_6 & \omega L_{11} - L_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_4 - \mu \\ L_8 - \omega \end{pmatrix}\quad [27]$$

Pour une prise de vue, nous obtenons deux équations pour trois inconnues (x, y, z). Le système est donc sous-estimé. Dès lors, un minimum de deux prises de vues doit être pris en compte pour reconstituer la position tridimensionnelle d’un objet présent sur les deux images.

Ainsi, pour $m \geq 2$ prises de vue

$$\begin{pmatrix} \mu^{(1)}L_9^{(1)} - L_1^{(1)} & \mu^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_2^{(1)} & \mu^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_3^{(1)} \\ \omega^{(1)}L_9^{(1)} - L_5^{(1)} & \omega^{(1)}L_{10}^{(1)} - L_6^{(1)} & \omega^{(1)}L_{11}^{(1)} - L_7^{(1)} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \mu^{(m)}L_9^{(m)} - L_1^{(m)} & \mu^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_2^{(m)} & \mu^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_3^{(m)} \\ \omega^{(m)}L_9^{(m)} - L_5^{(m)} & \omega^{(m)}L_{10}^{(m)} - L_6^{(m)} & \omega^{(m)}L_{11}^{(m)} - L_7^{(m)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_4^{(1)} - \mu^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \omega^{(1)} \\ \cdot \\ L_4^{(m)} - \mu^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \omega^{(m)} \end{pmatrix} \quad [28]$$

Les solutions x, y, z sont approximées par la même méthode des moindres carrés expliquée à la section 3.2.2.2.

En outre, la qualité de la restitution est évaluée par l’analyse des résidus, de la RMSE et des résidus globaux de restitution construits à partir des équations [16], [17] et [19].

8. DLT A 16 PARAMETRES – VALIDATION PAR UNE APPLICATION

8.1. INTRODUCTION

Comme pour la DLT à 11 paramètres, une application a été conçue afin de vérifier le fonctionnement efficace de la théorie par l’implémentation d’un algorithme dans l’environnement MATLAB.

La seule différence avec l’application précédente est la modification de l’algorithme pour qu’il intègre la modélisation des distorsions optiques. L’algorithme est testé sur la même maquette « Lego », les mêmes clichés et les mêmes positions des PC et PV. Nous pouvons ainsi comparer les deux algorithmes, avec ou sans prise en compte des distorsions optiques et vérifier de la sorte le bien-fondé de l’ajout de ces modélisations.

8.2. CALIBRATION DES CLICHES

8.2.1. Implémentation du programme de calibration

Dans cette section, l’implémentation sous MATLAB des équations de la DLT pour calibrer les différents clichés est présentée. Celle-ci peut être considérée comme la suite de l’algorithme de calibration à 11 paramètres précédemment expliquée. Sa principale amélioration est la prise en compte des distorsions optiques. Le programme de calibration, nommé *DLT_calibration_16p* est composé de 4 parties :

- importation des données ;
- construction des matrices et résolution par une méthode itérative ;
- contrôle de qualité ;
- exportation des résultats.

Pour chacune de ces étapes, la partie du script correspondante est présentée et expliquée. En outre, certaines considérations d’ordre pratique sont développées.

Importation des données

L’algorithme de calibration demande trois types d’input :

- les coordonnées-mondes des PC (sous la même forme que pour *DLT_calibration_11p*) ;

- les coordonnées-images des PC pour le cliché à calibrer (sous la même forme que pour *DLT_calibration_11p*);
- la taille du cliché en pixels.

La taille du cliché est utilisée pour calculer une première estimation des coordonnées du point principal. Le nombre de lignes et de colonnes est divisé par deux pour obtenir le centre de l'image. Cette position approximée du point principal sera introduite dans le système d'équations pour la première itération.

En plus, ce script intègre une amélioration d'ordre pratique importante. En effet, lors de l'application sur le modèle physique de la retenue d'eau, il est probable que tous les PC ne soient pas visibles dans un seul cliché. Quand un PC n'est pas présent dans un cliché, une ligne lui est cependant attribuée avec des valeurs égales à -1. Le programme générera automatiquement ces lignes afin de ne pas les prendre en compte dans la calibration via l'utilisation d'un index.

```
%% 1) Importation des données

%Importation du .xlsx des coordonnées_mondes.
com=xlsread('coo_monde_lego.xlsx');

% Importation du .xlsx des coordonnées_images.
coi=xlsread('coo_im_PC_legoL.xlsx');

indexcoi=find(coi(:,1)~= -1);      %ligne pour lesquelles il y a une
valeur.

%supprimer les lignes de coordonnées monde pour lesquels il y a un -1 dans
%la matrices coordonnées image.

index=find(coi(:,1)==-1);      %Trouver où sont les -1 de coi. A quelle ligne
de coi?

sizeindex=length(index);

for z=sizeindex:-1:1;
    com(index(z,1),:)=[];      %Supprimer les lignes de com qui correspondent
aux valeurs de l'index.
    coi(index(z,1),:)=[];      %Supprimer les lignes de coi qui correspondent
aux valeurs de l'index.
end

sizept=length(com);

%Entrer la taille de l'image (en pixels)
limax=3264;
colmax=4912;
```

Construction des matrices et résolution itérative

Le fragment de script présenté ci-dessous est le cœur du programme. Il a pour but de déterminer les 11 paramètres de la DLT ainsi que les 5 paramètres des distorsions optiques. Ce

script est divisé en sous-parties pour l’expliquer clairement. Attention toutefois, l’ensemble des sous-parties est compris dans une seule et même boucle.

L’élément de départ, à introduire par l’utilisateur, est le nombre d’itérations pour arriver à la convergence des 16 paramètres. L’utilisateur ne connaît pas ce nombre a priori. Par expérience, une trentaine d’itérations semblent suffisantes. Si ce nombre n’aboutit pas à la convergence, l’utilisateur sera averti de manière graphique afin qu’il augmente le nombre d’itérations.

Dans cette partie du script (ci-dessous), de nombreuses matrices sont construites. Elles peuvent être de taille importante en fonction du nombre d’itérations nécessaire à la convergence et du nombre de PC pris en compte. MATLAB n’oblige pas à déclarer la taille des matrices en début de programme. Cependant, le redimensionnement de celle-ci au fur et à mesure des itérations ralentit la vitesse d’exécution du programme. La solution est d’allouer aux matrices un espace figé. En pratique, les matrices sont emplies de zéros via la fonction *zeros (taille de la matrice)* pour « réserver » un espace de mémoire.

En outre, des tableaux à trois dimensions sont utilisés plutôt que de simples matrices (*figure 27*). On peut voir ces tableaux à 3 dimensions comme des cubes de données. L’utilisation de tels outils permet de stocker le résultat de chacune des itérations dans la troisième dimension pour contrôler l’exécution de la résolution.

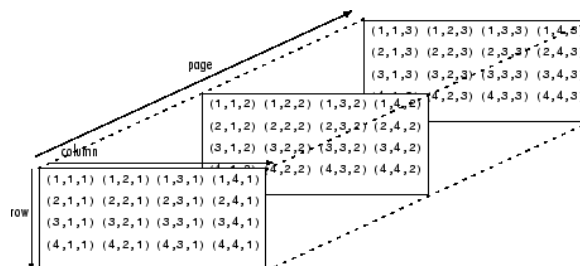


Figure 27 - Matrice à n dimensions

Source : (“Mathworks - Matlab,”)

En ce qui concerne les variables u_o et v_o , qui correspondent aux coordonnées du point principal et qui sont inconnues a priori, elles sont estimées au centre du cliché pour la première itération. L’autre variable, inconnue au départ est R. Sa valeur de départ est simplement 1 (Laplanche et al., 2008). En effet, dans la résolution de DLT à 11 paramètres, nous avons pu nous rendre compte que les paramètres L_9 , L_{10} et L_{11} qui déterminent la valeur de R sont très proches de zéro [23].

```
ite=30      % Entrer le nombre d'itérations

%Préallocation de la mémoire.
Uo=zeros(1,1,ite+1);
Vo=zeros(1,1,ite+1);
Vo(1,1,1)=limax/2;
Uo(1,1,1)=colmax/2;

xi=zeros(sizept,1,ite);
eta=zeros(sizept,1,ite);
rsquare=zeros(sizept,1,ite);
```



```

% Allocation des L, B, M et R
L=zeros(16,1,ite);
B=zeros(2*sizept,1);
M=zeros(2*sizept,16,ite);
R=ones(sizept,1,ite);           %R = 1

%Allocation de la mémoire pour la QR décomposition
Qb=zeros(2*sizept,2*sizept,ite);
triRb=zeros(2*sizept,16,ite);
Q=zeros(2*sizept,16,ite);
triR=zeros(16,16,ite);

temp=zeros(16,1,ite);

%Allocation de la mémoire pour les erreurs de distorsion (delta u et delta v)
ErrorDistoU=zeros(sizept,1,ite);
ErrorDistoV=zeros(sizept,1,ite);

% Allocation de la mémoire pour les erreurs de calibration
ErrorU=zeros(sizept,1,ite);
ErrorV=zeros(sizept,1,ite);

%Allocation de la mémoire pour la position de la camera
m1=zeros(3,3,ite);
m2=zeros(3,1,ite);
posicamxyz=zeros(3,1,ite);

```

Dans la sous-partie du script ci-dessous, la construction de la matrice [24] est effectuée. Au préalable, les coordonnées du PC doivent être exprimées par rapport au point principal pour les 12^{ème} à 16^{ème} colonnes de la matrice A [22].

Une première résolution au sens des moindres carrés est effectuée. On obtient de nouvelles valeurs de L_9 , L_{10} , L_{11} , on peut donc calculer un nouveau R et déterminer la position du point principal à partir de [23].

Ces nouvelles valeurs sont injectées dans les matrices A et B, une nouvelle résolution est effectuée.

Un indice de convergence doit être élaboré afin de vérifier si les paramètres L_i convergent effectivement. Cet indice est simplement la différence de la somme des L_i à chaque itération (Ernst, 2006). Un graphe représentant cet indice en fonction du nombre d’itérations est construit en fin de programme pour détecter si le calcul converge.

$$\text{indice de convergence} = \left| \sum_{i=1}^{nb \text{ itération}} L_i - \sum_{i=1}^{nb \text{ itération}} L_{i+1} \right|$$

où L est la somme des paramètres impliqués dans le système.

La méthode des moindres carrés utilise la décomposition QR avec substitution à rebours comme pour le programme *DLT_calibration_11p*. Elle est particulièrement stable pour les matrices mal conditionnées et donne de plus des résultats assez rapidement.

```
%Calcul des xi et eta (ce qui revient à un changement de réf)

for n=1:ite

    xi(:,1,n)=coi(:,1,1)-Uo(:,1,n);
    eta(:,1,n)=coi(:,2,1)-Vo(:,1,n);
    rsquare(:,1,n)=epsi(:,1,n).^2+ psi(:,1,n).^2 ;

% construction de la matrice B

B=reshape(flipud(rot90(coi)),numel(coi),1);

% construction de la matrice M

for i=1:sizept
    M(2*i-1,1:3,n)=com(i,1:3);
    M(2*i,5:7,n)=com(i,1:3);
    M(2*i-1,4,n)=1;
    M(2*i,8,n)=1;
    M(2*i-1,9:11,n)=(com(i,1:3).*-coi(i,1));
    M(2*i,9:11,n)=(com(i,1:3).*-coi(i,2));

    M(2*i-1,12,n)=epsi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)*R(i,1,n);
    M(2*i,12,n)=psi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)*R(i,1,n);

    M(2*i-1,13,n)=epsi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)^2*R(i,1,n);
    M(2*i,13,n)=psi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)^2*R(i,1,n);

    M(2*i-1,14,n)=epsi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)^3*R(i,1,n);
    M(2*i,14,n)=psi(i,:,n)*rsquare(i,:,n)^3*R(i,1,n);

    M(2*i-1,15,n)=(rsquare(i,:,n)+2*epsi(i,:,n)^2)*R(i,1,n);
    M(2*i,15,n)=epsi(i,:,n)*psi(i,:,n)*R(i,1,n);

    M(2*i-1,16,n)=epsi(i,:,n)*psi(i,:,n)*R(i,1,n);
    M(2*i,16,n)=(rsquare(i,:,n)+2*psi(i,:,n)^2)*R(i,1,n);

end

% Résolution du système par moindres carrés.

[Q(:,:,n),triR(:,:,n)]=qr(M(:,:,n),0); % QR factorisation

temp(:,:,n)=transpose(Q(:,:,n))*B;

L(:,1,n)=backsub(triR(:,:,n),temp(:,:,n)); %back substitution
```

La résolution par moindres carrés permet d'obtenir les premières valeurs des 16 paramètres. Les L_9 , L_{10} et L_{11} sont alors utilisés pour déterminer le R qui sera appliqué à l'itération suivante, ainsi que la nouvelle valeur du point principal.

Le programme arrive en fin de boucle et exécute à nouveau l'étape de construction des matrices et de la résolution par moindres carrés. La valeur de R et la position du point principal sont mises à jour. Les itérations se poursuivent ainsi jusqu'à ce que le programme arrive au nombre d'itérations demandées par l'utilisateur.

Le risque bien sûr est que les valeurs de L ne convergent pas ou pire, qu'elle converge mais vers des valeurs improbables.

Le premier problème est facilement identifié en construisant un graphique de l'évolution de l'indice de convergence au cours des itérations.

Pour le deuxième problème, à savoir la convergence vers une valeur mais qui n'a aucun sens pour notre programme, on peut facilement, à partir des 11 paramètres, déterminer des grandeurs physiques interprétables comme la position de la prise de vue dans le référentiel-monde ou encore les résidus du modèle.

```
%Calcul du nouveaux R, pour l'itération suivante.
R(:,1,n+1)=L(9,1,n)*com(:,1)+L(10,1,n)*com(:,2)+L(11,1,n)*com(:,3)+1;

%Points principaux
Dsqr=1/((L(9,1,n))^2 + (L(10,1,n))^2 + (L(11,1,n))^2 );
Uo(1,1,n+1)=Dsqr*(L(1,1,n)*L(9,1,n)+L(2,1,n)*L(10,1,n)+L(3,1,n)*L(11,1,n));
Vo(1,1,n+1)=Dsqr*(L(5,1,n)*L(9,1,n)+L(6,1,n)*L(10,1,n)+L(7,1,n)*L(11,1,n));

end
```

Contrôle qualité.

Cette partie du code concerne le calcul des résidus du modèle avec et sans prise en compte de la modélisation des distorsions optiques. Connaissant les paramètres, et les positions-mondes des PC, on détermine ainsi les coordonnées-images de chacun des PC que l'on compare à leurs coordonnées-images mesurées initialement. La différence de ces valeurs, appelée résidu, évalue la qualité du modèle. Le calcul des résidus est effectué à chaque itération.

```
%% Résidus de calibration

for n=1:ite
for i=1:sizept
    %Avec prise en compte de la distorsion
ErrorU(i,1,n)=coi(i,1,1)-ErrorDistoU(i,1,n)-
```

```

((L(1,1,n)*com(i,1,1)+L(2,1,n)*com(i,2,1)+L(3,1,n)*com(i,3,1)+L(4,1,n))/...
(L(9,1,n)*com(i,1,1)+L(10,1,n)*com(i,2,1)+L(11,1,n)*com(i,3,1)+1));

ErrorV(i,1,n)=coi(i,2,1)-ErrorDistoV(i,1,n)-
((L(5,1,n)*com(i,1,1)+L(6,1,n)*com(i,2,1)+L(7,1,n)*com(i,3,1)+L(8,1,n))/...
(L(9,1,n)*com(i,1,1)+L(10,1,n)*com(i,2,1)+L(11,1,n)*com(i,3,1)+1));

ErrorCalibration(i,1,n)=(ErrorU(i,1,n).^2+ErrorV(i,1,n).^2)^0.5;

    %Sans prendre en compte la distorsion.

ErrorUsansDisto(i,1,n)=coi(i,1,1)-
((L(1,1,n)*com(i,1,1)+L(2,1,n)*com(i,2,1)+L(3,1,n)*com(i,3,1)+L(4,1,n))/...
(L(9,1,n)*com(i,1,1)+L(10,1,n)*com(i,2,1)+L(11,1,n)*com(i,3,1)+1));

ErrorVsansDisto(i,1,n)=coi(i,2,1)-
((L(5,1,n)*com(i,1,1)+L(6,1,n)*com(i,2,1)+L(7,1,n)*com(i,3,1)+L(8,1,n))/...
(L(9,1,n)*com(i,1,1)+L(10,1,n)*com(i,2,1)+L(11,1,n)*com(i,3,1)+1));

ErrorCalibrationsansDisto(i,1,n)=(ErrorUsansDisto(i,1,n).^2+ErrorVsansDisto
(i,1,n).^2)^0.5;

end

ErrorCalibrationGlobal(1,1,n)=sum(ErrorCalibration(:,1,n))/sizept;
ErrorCalibrationGlobalb=reshape(ErrorCalibrationGlobal(1,1,:),ite,1);    %
pour réorganiser en une seule matrice les résultats

ErrorCalibrationGlobalsansDisto(1,1,n)=sum(ErrorCalibrationsansDisto(:,1,n)
)/sizept;
ErrorCalibrationGlobalbsansDisto=reshape(ErrorCalibrationGlobalsansDisto(1,
1,:),ite,1);

end

```

Exportation des résultats.

Les résultats à exporter sont bien sûr les 16 paramètres mais aussi la position du point principal de chaque cliché. En outre, d’autres valeurs peuvent être exportées comme les indices de convergence ou encore les erreurs dues aux distorsions. Tous ces éléments sont exportés dans le format .csv.

8.2.2. Résultats et analyses

Le programme *DLT_calibration_16p* est appliqué aux trois clichés *legoL*, *legoC*, *legoR*.

Cette section présente les résultats obtenus ainsi que leur analyse, portant sur quatre questions thématiques :

- Le processus itératif converge-t-il vers un résultat acceptable ?

- Les résidus obtenus sont-ils améliorés par rapport au programme *Calibration_DLT_11p*, autrement dit la modélisation des caméras est-elle de meilleure qualité lorsqu’une modélisation des distorsions optiques est intégrée ?
- La modélisation de ces distorsions peut-elle être simplifiée, par exemple en ne prenant en compte qu’un paramètre de distorsion radiale (12 paramètres) ou encore un paramètre de distorsion radiale et les deux paramètres de distorsion tangentielle (14 paramètres) ?
- Certaines configurations des PC sont-elles à éviter ?

Lorsque les résultats sont redondants pour plusieurs clichés, ils ne seront pas présentés.

8.2.2.1. Cliché *LegoL*

Convergence

L’indice de convergence défini auparavant est destiné à détecter la stabilisation des L_i au cours des itérations. Une stabilisation est obtenue lorsque l’indice vaut zéro. L’évolution de cet indice est représentée à la *figure 28*.

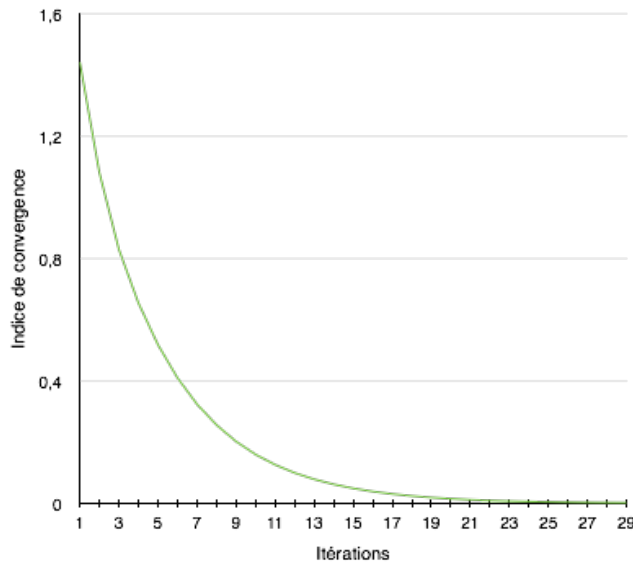


Figure 28 - Evolution de l'indice de convergence (*LegoL*)

Pour le cliché *LegoL*, les paramètres convergent vers zéro à la 25^{ème} itération. Les 16 paramètres L tendent donc vers des valeurs stables. Il convient à ce stade de contrôler la pertinence physique du modèle obtenu. Ainsi, la RMSE (en pixels) du modèle pour chaque itération est reportée sur le graphe suivant (*figure 29*).

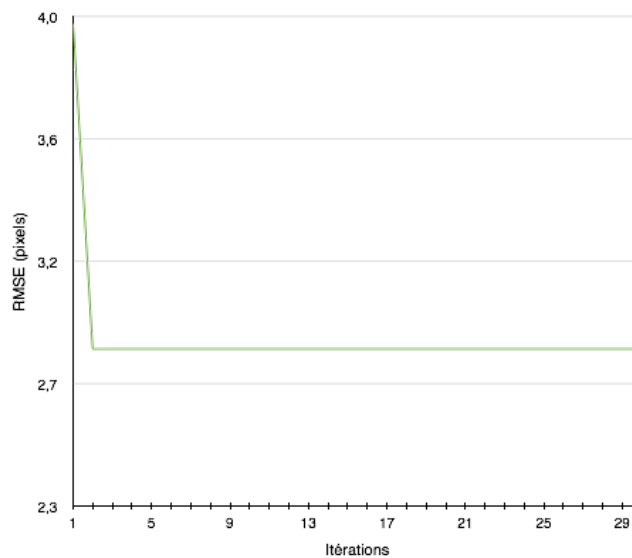


Figure 29 - Evolution du RMSE (pixels) (LegoL)

Deux constatations peuvent en être tirées. D’une part, le processus itératif converge effectivement vers une RMSE de l’ordre de 3 pixels. Ce résultat joue en faveur de la convergence vers une modélisation efficace de la prise de vue. D’autre part, la convergence de la RMSE est plus rapide que pour l’indice de convergence. En effet, une valeur stable de la RMSE est observée après 5 itérations alors que 25 itérations avaient été nécessaires pour l’indice. Ceci peut être expliqué par un indice de convergence mal adapté. Cependant, le processus n’étant que peut gourmand en temps (2 secondes pour un ordinateur de puissance normale), rien n’empêche d’utiliser cet indice, qui a le mérite de garantir une stabilité des paramètres L (même si celle-ci n’aboutit pas à une meilleure RMSE).

Résidus globaux de calibration [18]

Le tableau 9 reprend les RGC (en pixels) obtenus par PC via le programme *DLT_calibration_11p* et le programme *DLT_calibration_16p* pour permettre une comparaison. En outre, la RMSE diverses statistiques sont présentées en fin de tableau.

Tableau 9 - RGC et statistiques, LegoL

Point de calibration	résidus (pixels) 11p	résidus (pixels) 16p
1	20,2	3,9
2	12,8	4,2
3	12,9	1,7
4	11,2	1,4
5	6,9	4,0
6	2,3	3,1
7	5,6	5,4
8	2,1	2,0
9	4,8	2,0
10	10,8	0,4
11	4,8	1,7
12	22,2	3,0

13	22,4	2,6
14	6,0	5,5
15	9,6	2,0
16	8,1	3,9
17	13,4	3,5
18	34,9	5,0
19	22,8	1,9
Maximum	34,9	5,5
Minimum	2,1	0,4
RMSE	12,3	3,0
Ecart-type	8,6	1,4

Premièrement, la RMSE obtenue avec la modélisation des distorsions optiques est de 3 pixels alors que sans modélisation des distorsions elle en valait 12. Le gain de la modélisation des distorsions optiques est donc de 9 pixels ou d’une manière plus relative, un gain de 75%. Ce résultat extrêmement positif montre l’importance de la prise en compte des distorsions optiques lors de la calibration des prises de vue et peut d’ores et déjà être considérée comme une avancée par rapport à *DLT_calibration_11p*.

En vue d’affiner l’analyse, les RGC par PC avec et sans modélisation des distorsions optiques sont comparés (*figure 30*). Notons que les PC sont classés selon leur écart par rapport au point principal de la photo qui est reconnu pour être le point de départ des distorsions optiques.

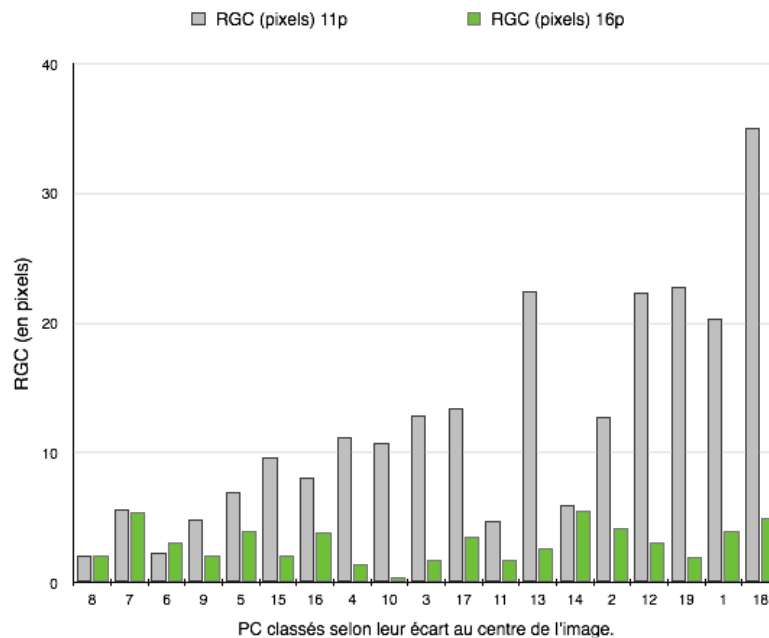


Figure 30 - RGC (pixels) par PC, LegoL

Une nette amélioration générale est observée lorsque la correction des distorsions optiques est intégrée, notamment sur les PC plus éloignés du point principal. Ainsi les résidus sont moins dispersés autour de la RMSE, l’écart-type est de 1,4 pixel pour la 16p contre 8.6 pixels pour la 11p. Plus aucune relation ne peut être détectée entre l’importance de RGC et la distance au point

principal de l’image. L’erreur systématique due aux distorsions optiques est corrigée, les RGC représentent alors les erreurs aléatoires de la modélisation.

Un autre moyen de s’en convaincre est l’analyse des résidus en u et en v (figure 31). On y observe une distribution de ceux-ci centrée sur zéro, ce qui indique l’absence de biais. En outre, la dispersion de ceux-ci est faible (écart-type de 2,5 pixels).

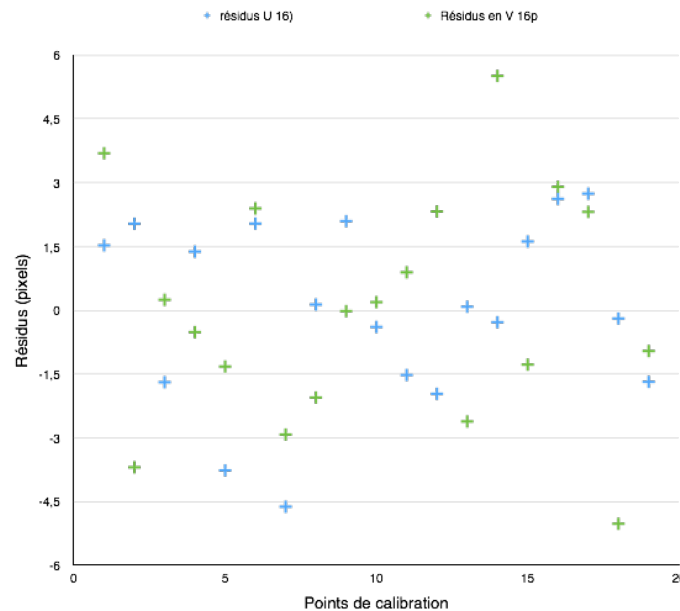


Figure 31 - Distributions des résidus en u et en v pour les PC, legoL

Modèles de distorsions optiques

Rappelons les équations de la modélisation des distorsions optiques décrites par Brown :

$$\Delta u = \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}(r^2 + 2\xi^2) + L_{16}\xi\eta$$

$$\Delta v = \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2)$$

□

Elles sont composées de 5 paramètres classés en deux groupes :

- L_{12} , L_{13} et L_{14} modélisent la distorsion radiale ;
- L_{15} et L_{16} modélisent la distorsion tangentielle.

Le but de cette section est de comparer trois modélisations de ces distorsions selon le nombre de paramètres intégrés. Quatre combinaisons de distorsions sont testées et analysées :

- Aucune modélisation des distorsions optiques (11 paramètres) ;
- modélisation de ces distorsions via un paramètre de distorsion radiale (12 paramètres) ;
- modélisation de ces distorsions via un paramètre de distorsion radiale et des deux paramètres de distorsion tangentielle (14 paramètres) ;
- Modélisation de ces distorsions via les 3 paramètres de distorsion radiale et des deux paramètres de distorsion tangentielle (16 paramètres).

En pratique, de légères modifications du code MATLAB permettent de construire ces 4 modèles différents en changeant les lignes relatives à la modélisation des distorsions optiques ainsi qu’en adaptant la taille des matrices. Par exemple, pour la modélisation de la distorsion via 12 paramètres le code devient :


```

for n =1 :ite
    for i=1 :sizept
        ErrorDistoU(i,1,n)=xi(i,1,n)*(L(12,1,n)*rsquare(i,1,n)) ;
        ErrorDistoV(i,1,n)=eta(i,1,n)*(L(12,1,n)*rsquare(i,1,n)) ;
    End
end

```

Les RMSE pour ces 4 groupes sont représentés graphiquement à la *figure 32*.

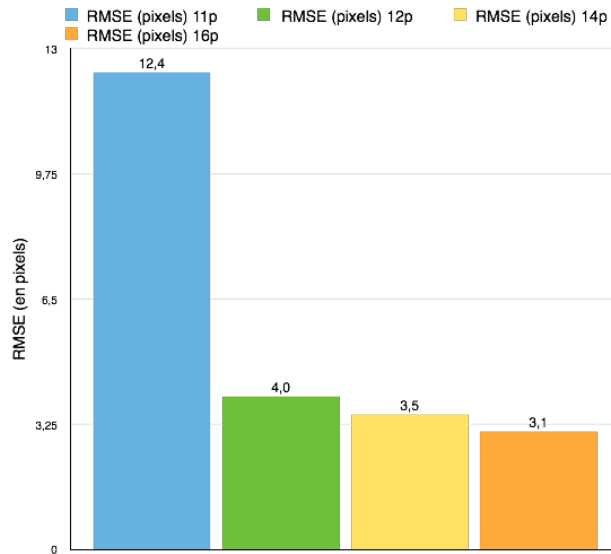


Figure 32 - Comparaison de la complexité de la modélisation des distorsions optiques

Ce graphe démontre que plus le nombre paramètres de distorsion est pris en compte, plus les RMSE sont faibles. Cependant la différence des RMSE en pixels se situe dans une gamme inférieure à la taille d’un pixel. Or, la précision de la digitalisation est supérieure à 1 pixel. Le gain de précision par la complexité accrue de la distorsion est donc tout relatif. Il est impossible d’obtenir une qualité de restitution supérieure à la qualité de la digitalisation.

Le temps d’exécution des programmes étant très semblables pour les 3 types de modélisation, le modèle à 16 paramètres sera préféré puisqu’il permet potentiellement de gagner en qualité de modélisation.

Configurations des points de calibration à éviter

Kwon (1998), dans ses recommandations au sujet de la distribution spatiale des PC, recommande d’éviter une configuration pour laquelle les points de calibration sont coplanaires. Afin de tester cette recommandation, une telle configuration est expérimentée pour le cliché legoL. Ainsi, 8 points appartenant quasiment à un même plan sont sélectionnés. Cette disposition peut être observée à la *figure 33*.

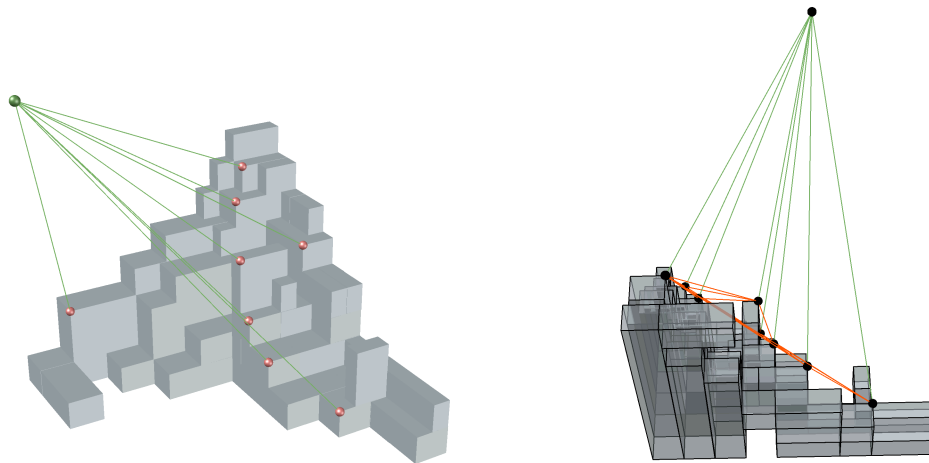


Figure 33 - Configuration coplanaire des PC, LegoL

L’algorithme de calibration à 16 paramètres est testé sur cet ensemble de PC quasi-coplanaires. L’évolution de l’indice de convergence pour 70 itérations est illustrée à la figure 34.

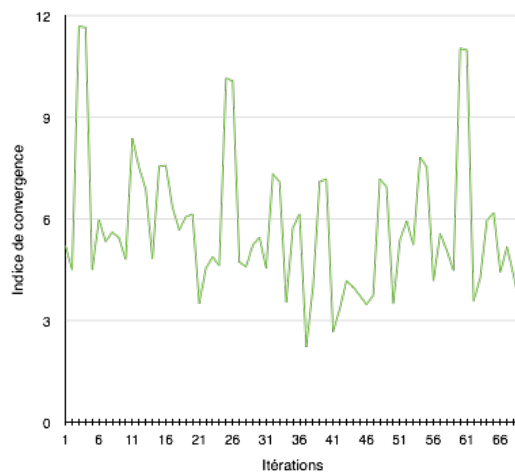


Figure 34 - Evolution de l’indice de convergence (configuration coplanaire), LegoL

Les résultats sont sans appel. D’une part, la valeur des paramètres ne tend pas à une stabilisation malgré un nombre important d’itérations. D’autre part, les résidus sont incohérents, de l’ordre de la taille de l’image (3900 pixels). Ces deux observations témoignent de l’impossibilité pour l’algorithme de construire correctement un modèle de calibration lorsque les points utilisés sont proches d’un même plan. Une attention particulière sera prêtée pour éviter cette désavantageuse configuration lors de la distribution spatiale des PC sur la maquette de retenue d’eau.

8.2.2.2. Cliché LegoC

L’algorithme de calibration de la DLT à 16 paramètres est appliqué au cliché legoC. La même démarche d’analyse des résultats est effectuée dans cette section, mises à part la configuration

des PC coplanaire ainsi que la variation de la modélisation des distorsions optiques. En effet, les résultats sont équivalents à ceux obtenus pour legoL.

Convergence.

L’indice de convergence tend vers zéro après 10 itérations et la RMSE se stabilise après 5 itérations (figure 35), comme pour legoL.

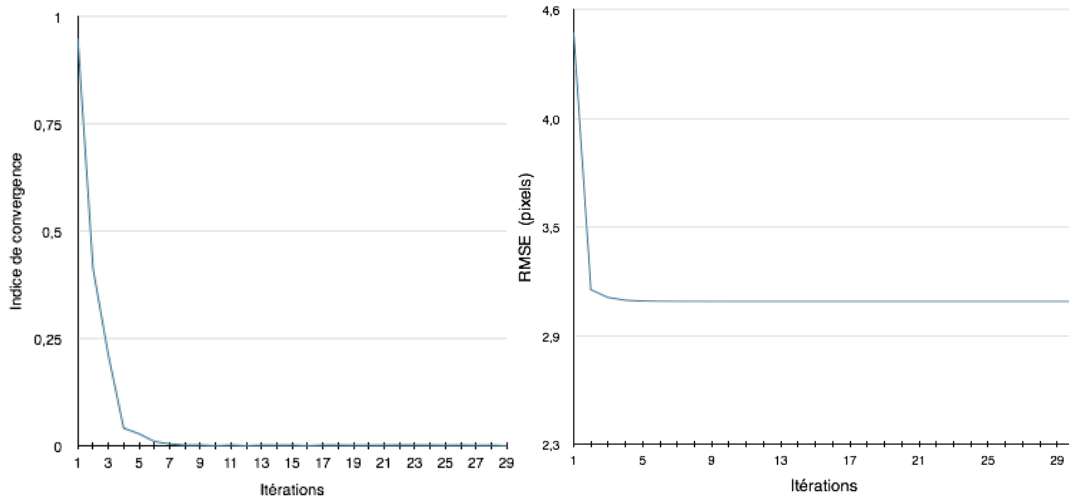


Figure 35 - Evolution de l’indice de convergence (à gauche) et de la RMSE (à droite) en fonction des itérations

Une variation de nombre d’itérations pourrait être expliquée par la configuration géométrique des PC dans l’image. En effet, la seule différence entre cette calibration et la précédente est la position du point de vue par rapport à la scène. Le nombre de PC et leur position sur la scène, les caractéristiques de la caméra, la précision attendue de la digitalisation sont des constantes. Ce changement de la position et de l’orientation du point de vue implique une projection différente de la constellation des PC dans l’image. La capacité de l’algorithme à converger rapidement dépend de son conditionnement, influencé par la configuration des PC. Lorsqu’on analyse les photos legoL et LegoC (figure 18), on s’aperçoit qu’elles ont été prises depuis deux points de vue certes différents mais qui ne modifient pas fortement la configuration des PC dans l’image. Ceci peut expliquer un même nombre d’itérations nécessaires à la convergence de la RMSE.

Résidus

La RMSE ainsi que divers indicateurs de l’échantillon des PC obtenus via les programmes *DLT_calibrations_11p* et *DLT_calibrations_16p* sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 10 - Résultats de la calibration, LegoC

	Calibration 11p	Calibration 16p
RGC Maximum (pixels)	32,1	7,4
RGC Minimum (pixels)	0,9	0,4
RMSE (pixels)	8,1	2,8
Ecart-type	8,3	1,7

(pixels)		
----------	--	--

L’intégration de la modélisation des distorsions optiques fournit un modèle de calibration de bien meilleure qualité (estimé à 3 pixels) que le modèle n’intégrant pas les distorsions optiques (8 pixels). Le RGC maximum est proportionnellement plus réduit que le RGC minimum. Ceci traduit un effet accru de la modélisation des distorsions optiques sur les PC présentant des RGC plus importants. En outre, l’analyse des écarts-types des RGS indique une dispersion plus tenue quand les distorsions optiques sont prises en compte dans la DLT. L’observation de la *figure 36* aboutit aux mêmes remarques.

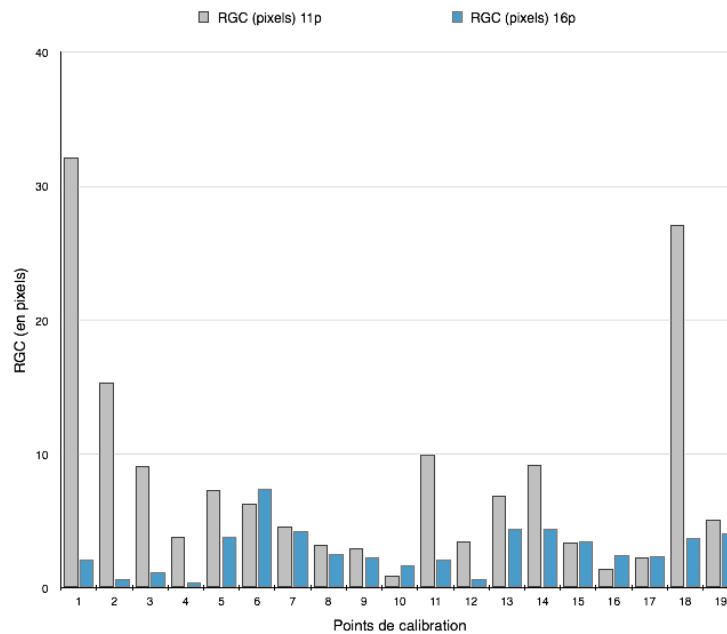


Figure 36 - RGC (en pixels) par PC, legoC

8.2.2.3. Cliché LegoR

L’algorithme de calibration *DLT_calibration_16p* est appliqué au 3^{ème} cliché, legoR. La suite résume les constatations importantes tant d’un point de vue de la convergence de la méthode itérative que d’un point de vue de la qualité du modèle.

Convergence.

De manière similaire aux deux autres clichés, l’indice de convergence ainsi que l’évolution du résidu moyen au cours des itérations sont présentés graphiquement (*figure 37*).

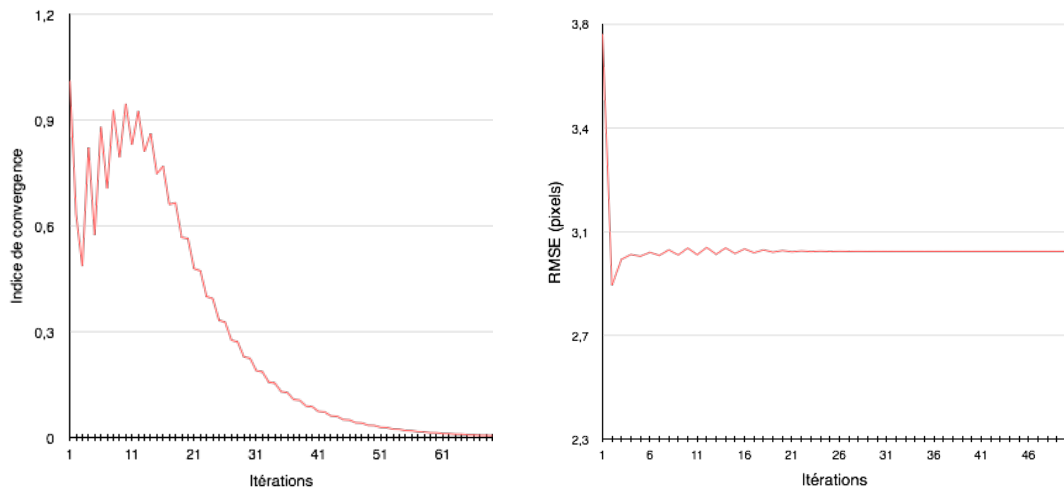


Figure 37 - Evolution de l'indice de convergence (à gauche) et de la RMSE (à droite) en fonction des itérations

Ces deux graphes témoignent d’une stabilisation des paramètres L_i et de la RMSE plus laborieuse. En effet, une septantaine d’itérations est nécessaire pour tendre à un indice de convergence égal à zéro tandis que la stabilisation du résidu moyen est observée après 25 itérations. Ceci correspond à une augmentation relativement importante du nombre d’itérations par rapport aux deux autres clichés. La tentative d’explication du nombre d’itérations nécessaires à la convergence initiée dans la section précédente pourrait être confirmée grâce à ce cas. En effet, un plus grand nombre d’itérations serait associé à une configuration moins idéale des PC dans l’image. Or, lorsque la position du point de vue et le résultat de la projection des PC dans le cliché sont considérés, le point de vue est d’une part fort désaxé mais aussi plus éloigné de la maquette. Il en résulte une projection de la constellation des PC en une zone moins étendue (figure 18).

Néanmoins, les PC n’étant pas coplanaires, la méthode itérative aboutit à une RMSE de 3 pixels, résultat comparable aux RMSE obtenus pour les autres clichés.

RMSE

Le RMSE ainsi que divers indicateurs de l’échantillon des PC, obtenus par les programmes *DLT_calibrations_11p* et *DLT_calibrations_16p* sont présentés dans le tableau 11 suivant.

Tableau 11 - Résultats de la calibration, LegoR

	résidus (pixels) 11p	résidus (pixels) 16p
RGC Maximum (pixels)	43,4	7,0
RGC Minimum (pixels)	0,5	0,4
RMSE (pixels)	7,3	2,9
Ecart-type (pixels)	9,7	1,8

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour les deux autres clichés.

Un enseignement global de la démarche de calibration sera fourni à la section 4.5.3.

8.3. RESTITUTION DE LA SCENE

Dans ce chapitre, la restitution tridimensionnelle de la scène avec prise en compte de la modélisation des distorsions optiques est implémentée et étudiée. A ce stade, seuls 9 PV uniformément répartis sur la scène sont restitués. L’intérêt de ces 9 points est que leurs coordonnées-mondes sont connues. Il est dès lors possible d’évaluer la qualité de la restitution.

8.3.1. Implémentation du programme de restitution

Le programme de restitution, nommé *DLT_Resitution_16p* traduit les équations développées précédemment (*section 4.4.3*). Il est composé de 4 parties principales :

- importation des données ;
- implémentation et résolution du système ;
- contrôle de la qualité ;
- exportation des résultats.

Cette division sert de structure à l’explication du code.

Importation des données

Les premières informations demandées à l’utilisateur sont le nombre de caméras utilisées pour la restitution ainsi que le nombre de points homologues (pour le moment ce nombre correspond au nombre de PV). En outre, les 16 paramètres L (fichiers .csv), la position du point principal (fichiers .csv) et les coordonnées-images des points homologues pour chaque image (fichiers .xlsx) sont importés.

```
%% Importation des données

nCam=3           %nombre de caméras
nHo=9           %nombre de points homologues maximum

%Paramètres L
L=zeros(16,1,nCam);

L(:,1,1)=csvread('L_legoL_10PC.csv');
L(:,1,2)=csvread('L_legoC_10PC.csv');
L(:,1,3)=csvread('L_legoR_10PC.csv');
%L(:,1,4)=csvread('...csv');
%etc selon le nombre de caméras

%Coordonnées du point principal pour chaque image
PP=zeros(1,2,nCam);

PP(:,:,1)=csvread('PP_legoL_10PC.csv');
PP(:,:,2)=csvread('PP_legoC_10PC.csv');
PP(:,:,3)=csvread('PP_legoR_10PC.csv');
%PP(:,:,4)=csvread('...csv');
%etc selon le nombre de caméras

%Points homologues (ici les points de vérification pour le moment)
hom=zeros(nHo,2,nCam);

hom(:,:,1)=xlsread('coo_im_PV_legoL.xlsx');
hom(:,:,2)=xlsread('coo_im_PV_legoC.xlsx');
hom(:,:,3)=xlsread('coo_im_PV_legoR.xlsx');
%hom(:,:,4)=xlsread('...xlsx');
```

```

%etc selon le nombre de caméras

%Trouver où se trouvent les -1 (pas de valeur)
index=find(hom(:, :, :)==-1);

%Coordonnées monde des points de vérification.
GCPmonde=xlsread('coo_monde_check.xlsx');

```

Ensuite un espace de mémoire est alloué aux matrices d’intérêt pour les mêmes raisons développées lors de l’explication de *DLT_Calibration_16p*.

```

%Allocation de la mémoire
xi=zeros(nHo,1,nCam);
eta=zeros(nHo,1,nCam);
rsquare=zeros(nHo,1,nCam);

ErrorDistoU=zeros(nHo,1,nCam);
ErrorDistoV=zeros(nHo,1,nCam);

muom=zeros(nHo,2,nCam);

xyz=zeros(1:nHo,1:3);

```

Formulation et résolution du système

La construction du système commence par le calcul des erreurs produites par les distorsions optiques pour chaque PV (ou point homologue).

```

%% Préparation des variables

%calcul des xi et eta et rsquare

for n=1:nCam

xi(:,1,n)=hom(:,1,n)-PP(1,1,n);
eta(:,1,n)=hom(:,2,n)-PP(1,2,n);
rsquare(:,1,n)=xi(:,1,n).^2+ eta(:,1,n).^2;

%Calcul des erreurs de distorsion.

    for i=1:nHo

ErrorDistoU(i,1,n)=xi(i,1,n)*(L(12,1,n)*rsquare(i,1,n)+L(13,1,n)*rsquare(i,1,n).^2+L(14,1,n)*rsquare(i,1,n).^3)+...
L(15,1,n)*(rsquare(i,:,n)+2*xi(i,:,n).^2)+L(16,1,n)*xi(i,:,n)*eta(i,:,n);

ErrorDistoV(i,1,n)=eta(i,1,n)*(L(12,1,n)*rsquare(i,1,n)+L(13,1,n)*rsquare(i,1,n).^2+L(14,1,n)*rsquare(i,1,n).^3)+...
L(15,1,n)*xi(i,:,n)*eta(i,:,n)+L(16,1,n)*(rsquare(i,:,n)+2*eta(i,:,n).^2);

    end

muom(:,1,n)= hom(:,1,n)-ErrorDistoU(:,1,n);
muom(:,2,n)=hom(:,2,n)-ErrorDistoV(:,1,n);

```

end

Ensuite, la construction du système matriciel [28]. Cependant, la restitution d’un point ne peut se faire que si ce point est présent dans au moins deux clichés. Le code intègre cette condition. La résolution du système par moindres carrés se fait via la fonction *mldivide()* de MATLAB. Cette fonction, très puissante, vérifie le conditionnement des matrices et applique la résolution par moindres carrés optimale à ce conditionnement.

```

sizeindex=length(index);

for z=sizeindex:-1:1;
    muom(index(z,1))=NaN;    %Remettre le NaN quand il n'y a pas de valeur.
end

%Réorganisation de la matrice mu omega (muom), pour des facilités de
calcul.

muomb=reshape(muom,nHo,2*nCam);

for i=1:nHo

    % Liste des caméras pour lesquels il n'a pas de NaN.
    camlist=find(isnan(muomb(i,1:2:nCam*2))==false);

    % Si il y a plus de deux caméras, on peut restituer.
    if numel(camlist)>=2

        m1=[];
        m2=[];

        m1(1:2:numel(camlist)*2,1)=muomb(i,camlist*2-1).*L(9,camlist)-
L(1,camlist);
        m1(1:2:numel(camlist)*2,2)=muomb(i,camlist*2-1).*L(10,camlist)-
L(2,camlist);
        m1(1:2:numel(camlist)*2,3)=muomb(i,camlist*2-1).*L(11,camlist)-
L(3,camlist);

        m1(2:2:numel(camlist)*2,1)=muomb(i,camlist*2).*L(9,camlist)-
L(5,camlist);
        m1(2:2:numel(camlist)*2,2)=muomb(i,camlist*2).*L(10,camlist)-
L(6,camlist);
        m1(2:2:numel(camlist)*2,3)=muomb(i,camlist*2).*L(11,camlist)-
L(7,camlist);

        m2(1:2:numel(camlist)*2,1)=L(4,camlist)-muomb(i,camlist*2-1);
        m2(2:2:numel(camlist)*2,1)=L(8,camlist)-muomb(i,camlist*2);

        xyz(i,1:3)=mldivide(m1,m2);

    end

end
end

```


Contrôle qualité

Le calcul des résidus par PV selon x, y et z ainsi que la RMSE sont ensuite calculés. C’est à partir de ces valeurs que la qualité du modèle de restitution sera évaluée. En outre, un graphique représentant les RGR obtenus par PV est construit.

```
%% controle qualité

ErrorX=xyz(:,1)-GCPmonde(:,1);
ErrorY=xyz(:,2)-GCPmonde(:,2);
ErrorZ=xyz(:,3)-GCPmonde(:,3);
ErrorGlobal=(sum((ErrorX.^2+ErrorY.^2+ErrorZ.^2).^0.5))/nHo;

ErrorXYZ=(ErrorX.^2+ErrorY.^2+ErrorZ.^2).^0.5;

%Plot
figure;
hold on
bbar16=bar(ErrorXYZ);
xlabel('Points de vérification');
ylabel('Résidus (mm)');
title('Résidus par GCP - prise en compte la distorsion');
```

Exportation des résultats.

Enfin, les coordonnées-mondes obtenues pour les points visibles depuis plusieurs clichés sont exportées avec l’extension.csv.

```
%Exportation des points restitués
exportXYZ=xlswrite('XYZ',xyz);
```

8.3.2. Résultats et analyses

Dans cette section sont présentés les résultats de l’application du programme de restitution. La question d’intérêt est: quelle est l’influence de la prise en compte des distorsions optiques lors de la restitution?

L’élément important qui diffère entre les programmes *restitution_DLT_11p* et *restitution_DLT_16p* est l’intégration de la modélisation des distorsions optiques. C’est cette intégration qui doit être validée.

Les éléments constants de l’expérience sont :

- Prise en compte des 3 clichés legoL, legoC et legoR
- Calibration effectuée avec 19 points de calibration.
- Calibration effectuée en prenant en compte de la distorsion à 5 paramètres (16p)

Le tableau suivant reprend les RGR (en mm) [eq. 19] pour chacun des PV obtenus via l’algorithme de restitution.

	C + L + R (11p)	C + L + R (16p)
--	--------------------	--------------------

A	1,2	1,2
B	0,6	0,2
C	0,7	0,3
D	0,6	0,5
E	0,6	0,8
F	0,4	0,2
G	0,7	0,2
H	0,8	0,1
I	2,0	0,1
RMSE (mm)	0,8	0,4

Lorsque les distorsions optiques sont modélisées, la RMSE obtenue est divisée par deux. Ainsi l’erreur de restitution équivaut à un demi-millimètre. La modélisation des distorsions peut donc être considérée comme une avancée majeure en terme de qualité de restitution.

Une limite est apportée à cette dernière conclusion.

En effet, lorsque une analyse des RGR par PV (*figure 38*) est effectuée, la modélisation de la distorsion n’apporte pas systématiquement une correction efficace.

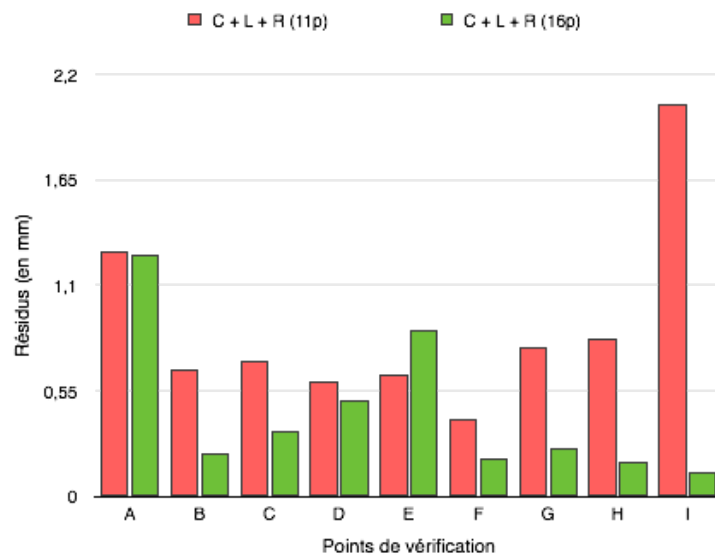


Figure 38 - RGR (en mm) par PV (comparaison 11p - 16p).

On observe des RGR inférieurs au demi-millimètre pour tous les PV mis à part pour le point A et le point E. Une explication en accord avec les conclusions de Chen et al., (1994) réside dans le fait que ces deux points se situent en dehors de la zone de calibration. Cependant, le point I qui lui aussi est en dehors de la zone de calibration bénéficie grandement de la modélisation de la distorsion. Le pouvoir d’extrapolation de l’algorithme n’est pas consistant.

Dès lors, lors de l’expérience sur la maquette de retenue d’eau, il est recommandé d’éviter de restituer des points en dehors de la zone de calibration.

9. ENSEIGNEMENTS

9.1. RESUME ET ENSEIGNEMENTS DE LA CALIBRATION

Le point de départ du processus de calibration nécessaire à la détermination des paramètres intrinsèques (focale et position du point principal) et extrinsèques (position du centre de projection dans l’espace et angles de la prise de vue) indispensables à une restitution tridimensionnelle d’une scène de qualité était un modèle linéaire n’intégrant pas les distorsions engendrées par l’optique des appareils photographiques utilisés. Lors de l’évaluation de la qualité de la modélisation de la prise de vue (ou calibration), des erreurs systématiques ont été détectées : les résidus planimétriques par PC augmentent avec leur écart au point principal. Ces erreurs systématiques pouvant être associées aux distorsions engendrées par le système optique, une modélisation de celles-ci est intégrée à l’algorithme de calibration initial. Ce modèle des distorsions optiques, connus sous le nom de Brown, a fait ses preuves au cours de l’histoire de la photogrammétrie aérienne et terrestre. Il modélise les distorsions symétriques radiales grâce à trois paramètres et les distorsions tangentiels via deux paramètres supplémentaires. La prise en compte de ces 5 paramètres n’est pas obligatoire. Il a été montré cependant qu’ils permettaient d’obtenir les meilleurs résultats. Intégrée au module de calibration, cette modélisation a montré toute sa puissance pour les 3 clichés de la scène. En effet, comme le suggère le *tableau 12* et le graphe associé (*figure 39*), l’intégration de cette modélisation améliore considérablement la qualité de la calibration des prises de vue, avec une amélioration des RMSE jusqu’à 9 pixels.

Tableau 12 - Comparaison Calibration_DLT_11p et 16p

	LegoL		LegoC		LegoR	
	Sans correction distorsion (11p)	Avec correction de la distorsion (16p)	Sans correction distorsion (11p)	Avec correction de la distorsion (16p)	Sans correction distorsion (11p)	Avec correction de la distorsion (16p)
RMSE (pixels)	12,3	3,0	8,1	2,8	7,3	2,9
Gains (pixels)	9,3		5,3		4,4	

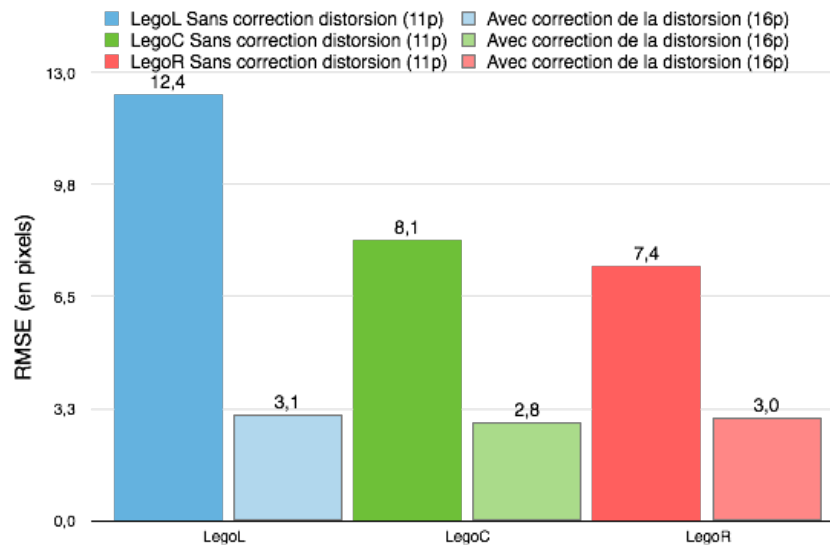


Figure 39 - Comparaison de la calibration avec et sans modélisation des distorsions optiques pour chaque prise de vue

Le modèle étant débarrassé de ses erreurs systématiques, seules celles aléatoires attestent de la qualité de la modélisation des prises de vue. Ces erreurs, dans les conditions expérimentales établies équivalent pour les trois clichés à une valeur de 3 pixels.

En outre, l’intégration de la modélisation - non linéaire - des distorsions optiques transforme le système jusqu’alors linéaire en un système non linéaire. Dès lors, un processus itératif est utilisé pour tendre progressivement vers une calibration stable. L’indice de convergence développé permet de rendre compte de cette convergence. La vitesse de convergence s’est montrée tributaire de la configuration des PC dans le plan-image. Cette configuration est dépendante :

- d’une part de la constellation des PC distribués sur la scène ;
- mais aussi de la position du centre optique de la caméra.

Concernant la constellation des PC sur la scène, plusieurs enseignements tirés de la littérature et des expériences doivent être précisés :

- Une disposition coplanaire des PC aboutit à l’incapacité du système à converger vers des paramètres stables. En d’autres mots, les PC doivent former un volume de calibration.
- Une augmentation du nombre de PC dans la zone induit probablement une meilleure distribution de la constellation. (Chen et al., 1994)

A propos de la position du centre optique qui détermine la manière dont est projetée la constellation dans l’image, il faut éviter une position trop éloignée de la scène ainsi qu’un angle de vue trop désaxé par rapport au volume de calibration. Ces deux principes permettent une projection plus favorable des PC dans l’image. Ainsi, plus la répartition des PC sur le champ de l’image est homogène, plus le système est bien conditionné. Cela aboutit à une convergence plus rapide de l’algorithme.

Théoriquement, la résolution du système se basant sur l’estimation par les moindres carrés, un nombre plus important de PC permettent de gérer ou en tout cas de s’affranchir d’erreurs aléatoires lors de la digitalisation ou de la détermination des coordonnées-mondes des PC (Chen et al., 1994).

Plusieurs éléments influençant la qualité de la calibration sont détectés :

- La qualité des prises de vue (résolution, distance à la scène, netteté) ;
- La qualité de la constellation des PC (nombre, distribution) ;
- la qualité de la digitalisation des PC ;
- la qualité de la détermination des coordonnées-mondes des PC ;
- La qualité intrinsèque de l’algorithme de calibration ;
- La qualité de la modélisation des distorsions optiques.

L’ensemble de ces enseignements doit être absorbé pour préparer au mieux l’application du module de calibration à l’application au modèle réduit de la retenue d’eau.

Ces considérations sont exprimées pour la phase de calibration. Cependant, c’est la qualité de la restitution qui nous intéresse particulièrement.

9.2. RESUME ET ENSEIGNEMENTS DE LA RESTITUTION

L’objectif de la restitution est de reconstruire tridimensionnellement l’ensemble des points communs à au moins deux prises de vues calibrées d’un objet. La qualité de la restitution dépend a priori directement de :

- la qualité de la calibration des prises de vues ;
- la qualité de la détection des points homologues dans les différents clichés ;
- ainsi que de la qualité intrinsèque de l’algorithme de restitution.

Le module de restitution développé intègre les distorsions optiques engendrées par l’objectif des appareils. Sur base de la restitution des PV, la prise en compte de ces distorsions représente un gain de 50% sur l’erreur de restitution. Par extension, on peut s’attendre à une erreur d’un demi-millimètre sur la restitution entière de la maquette « Lego ». Celle-ci n’est cependant pas possible à ce stade, puisqu’aucun système de détection semi-automatique ou automatique des points homologues aux différents clichés n’a été développé.

Un élément très important pour garantir une erreur de restitution minimale est de restituer uniquement les points situés à l’intérieur de la zone décrite par les PC, la zone de calibration. En effet, il apparaît sur base de l’expérience que les PV situés en dehors de cette zone peuvent être relativement mal restitués.

La méthode des moindres carrés permet l’utilisation de plusieurs appareils photographiques. Il est même conseillé d’en utiliser un maximum afin d’augmenter la redondance des observations et donc la fiabilité de la restitution.

Au regard des résultats obtenus, les algorithmes de calibration (*Calibration_DLT_16p*) et de restitution (*Restitution_DLT_16p*) intégrant la modélisation des distorsions optiques ainsi que le protocole d’acquisition de données sont jugés mûrs et suffisamment performants pour leur application à la retenue d’eau.

PARTIE III – APPLICATION DE LA DLT AU MODELE REDUIT DE RETENUE D’EAU

10. INTRODUCTION ET PRESENTATION DE L’OBJET D’ETUDE

10.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les algorithmes de calibration (*Calibration_DLT_16p*) et de restitution (*Restitution_DLT_16p*) seront appliqués à l’objet d’étude initial, le modèle réduit de retenue d’eau. Le but est d’en effectuer une restitution tridimensionnelle avant et après sa rupture par surverse. Au cours des chapitres suivants seront présentées certaines recommandations si la restitution venait à être dynamique, c’est-à-dire effectuée à intervalles de temps pendant la rupture (entre le temps initial et le temps final).

Le protocole (*figure 14*) de préparation à l’application des algorithmes sera ajusté et utilisé pour la retenue d’eau. Les PC et PV seront distribués spatialement sur la maquette en considérant les enseignements acquis de l’application « Lego » :

- nombre minimum de PC pour satisfaire les systèmes d’équation (8 PC si le programme *Calibration_DLT_16* est utilisé) ;
- la zone à restituer doit être située à l’intérieur de la zone formée par les PC ;
- à l’intérieur de cette zone, les points de calibration doivent être répartis uniformément ;
- une augmentation du nombre de PC engendre une augmentation de la probabilité d’obtenir une bonne répartition de ceux-ci ;
- une augmentation du nombre de PC aboutit à une surdétermination du système d’équations. La technique des moindres carrés permet d’obtenir les résultats les plus probables.

La position tridimensionnelle des PV et PC dans le référentiel-monde sera obtenue via l’utilisation d’un tachéomètre. Certaines considérations d’ordre technique et pratique seront abordées concernant l’utilisation cet outil de mesure.

Quatre prises de vues de la scène seront acquises au temps initial et quatre autres prises de vue le seront au temps final. Les cibles seront alors digitalisées pour ces 8 clichés en utilisant le logiciel XnView.

Les éléments indispensables au fonctionnement des algorithmes de la DLT seront alors tous réunis. Le résultat de la calibration des prises de vue et de la restitution (des PV à ce stade) seront alors présentés et analysés afin de valider ou non l’hypothèse de départ.

Certains éléments seront d’ores et déjà mis en place pour l’extension de l’application à une restitution dynamique. En effet, l’expérience en mode dynamique implique certaines considérations :

- une calibration des clichés est possible uniquement au temps final et au temps initial puisque l’eau envahira la scène en cours d’expérience ;
- une série de PC et de PV seront disséminés au temps initial ;

- une autre série de PC et de PV seront disséminés au temps final ;
- les clichés seront calibrés sur base du total des PC au temps initial et au temps final. La zone calibrée constituera alors un volume de calibration ;
- les points à restituer devront si possible faire partie de ce volume ;
- ceci implique bien entendu que les appareils photos doivent être stables et que les paramètres de prise de vue (la focale surtout) soient fixés.

A l’issue de ce chapitre, aucune reconstruction totale de la scène ne sera effectuée mais sur base des points de vérification, la technique de la DLT sera jugée ou non apte à fournir une restitution dans la gamme de précision demandée. Pour une restitution complète de la scène, il manque en effet une étape d’importance : la détection des points homologues aux différentes images.

Enfin, certaines recommandations seront formulées si l’expérience devait être appliquée à une autre expérience de surverse.

10.2. OBJET D’ETUDE

L’objet d’étude (présenté à la *section 3.3.1*) est un modèle réduit de retenue d’eau (*figure 40*), dont les dimensions sont 3,5 x 3,75 mètres. Celles-ci sont approximativement 20 fois plus importantes que celles de la maquette « Lego ».



Figure 40 - Maquette de la retenue d'eau.

Lors de l’expérience, une rupture de l’ouvrage par surverse est simulée. Le bassin amont est continuellement alimenté jusqu’à ce que l’eau outre passe la digue et entraîne progressivement avec elle le barrage. Les éléments constitutifs restituables au temps initial sont les graviers en calcaire de calibre 7-14 mm. Au temps final, les éléments restituables sont les fragments du cœur argileux d’une quinzaine de centimètres ainsi que les graviers. Pour respecter l’hypothèse de départ, les erreurs de restitution devront donc être inférieures à 7 mm.

11. PROROTOCLE

11.1. DISTRIBUTION DES PC ET DES PV

Les PC et PV sont matérialisés par des cibles circulaires (*figure 21*) imprimées sur papier. Celles-ci ont une dimension de 4 x 4 cm afin d’être identifiables facilement dans les clichés. Leur centre circulaire d’un diamètre de 2 mm permet une digitalisation et l’obtention des coordonnées-monde précises.

Au temps initial, 25 PC et 12 PV sont distribués uniformément sur la crête, la partie aval de la retenue d’eau ainsi que sur ses parties latérales. Une attention particulière est portée pour que les PC ne soient pas coplanaires (*figure 41*).

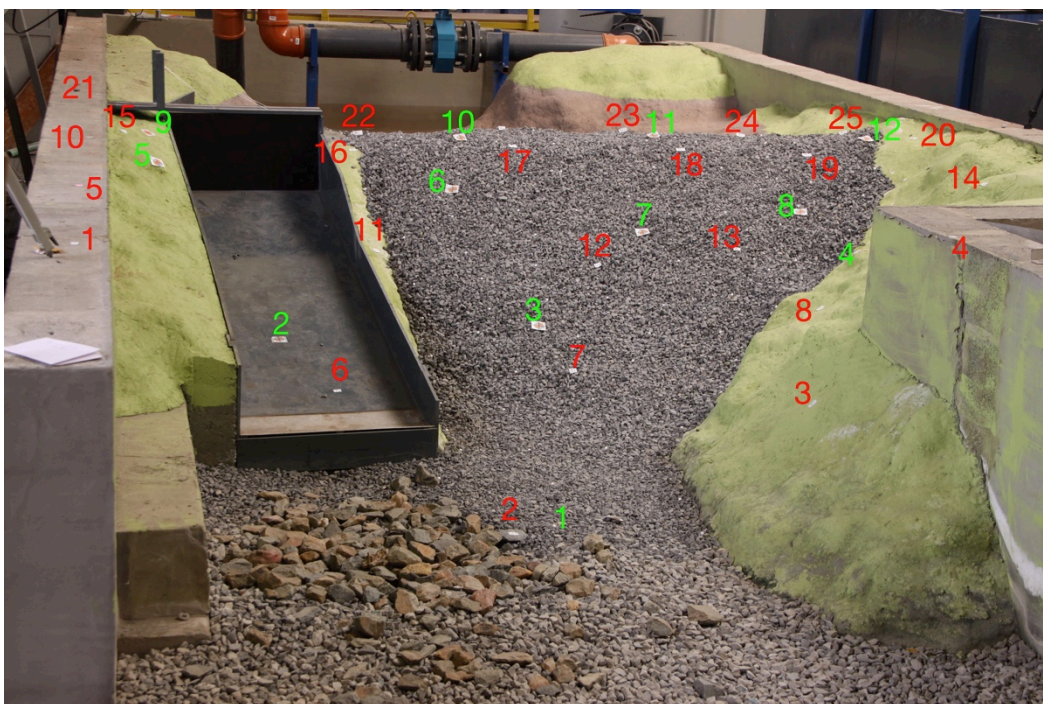


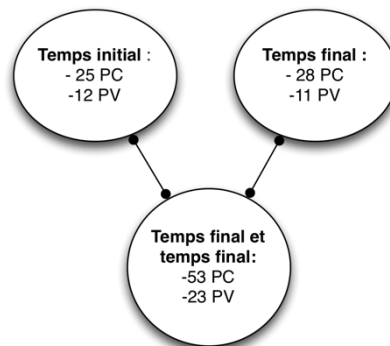
Figure 41 - Distribution spatiale des PC (rouge) et PV (vert) (temps initial) (50d)

Les mêmes critères sont utilisés pour distribuer 28 PC et 11 PV au temps final (*figure 42*).



Figure 42 - Distribution des PC (rouge) et PV (vert) au temps final

Ainsi en comptabilisant le nombre de cibles pour le temps final et le temps initial, 53 PC serviront à calibrer les appareils photos et 23 PV seront utilisés pour évaluer la qualité de la restitution.



Enfin, il est à remarquer qu’aucun PV n’a pu être disposé sur la maquette entre le temps initial et le temps final, c’est simplement irréalisable dans une telle expérience. Il sera donc impossible de valider la qualité de la restitution du temps t , entre le temps initial et le temps final.

11.2. DETERMINATION DES COORDONNEES-MONDES DES POINTS DE CALIBRATION ET DE VERIFICATION (UTILISATION D’UN TACHEOMETRE)

11.2.1. Concepts généraux

La détermination des coordonnées (x, y, z) dans le référentiel-monde des PC et de PV demande l’utilisation d’un tachéomètre (ou station totale). Un tachéomètre est la combinaison d’un

théodolite (mesure d’angles verticaux et horizontaux) et d’un distance-mètre électronique. Le principe de base d’un tachéomètre est relativement simple : les coordonnées tridimensionnelles d’un point sont établies à partir de la mesure de:

- la distance oblique entre le point de coordonnées inconnues et le tachéomètre ;
- un angle horizontal (Hz) mesuré par rapport à une direction de référence aléatoire mais fixe ;
- un angle vertical (V) mesuré par rapport à l’azimut.

Ainsi, les coordonnées planimétriques (x, y), sont exprimées dans un référentiel droit dont l’origine est l’intersection entre l’axe optique (O) et l’axe principal (P) de l’appareil (*figure 43*) et dont la direction de référence coïncide avec l’axe Y. L’axe Z suit la verticale locale.

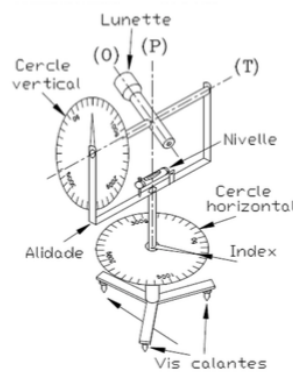
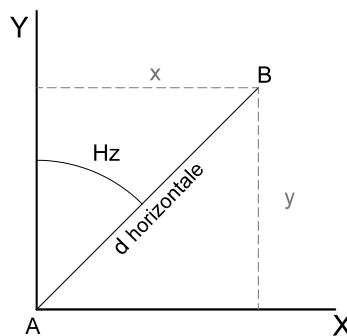


Figure 43 - Anatomie d'un tachéomètre

Source : (Billen, 2014)

Les coordonnées (x, y, z) dans ce référentiel sont déterminées selon les équations :

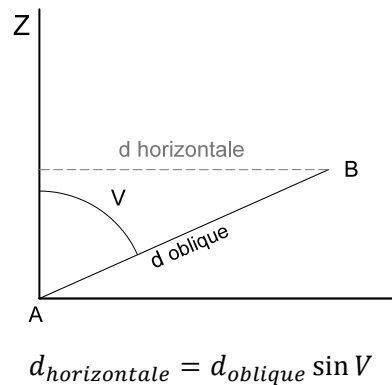


$$x_B = d_{horizontale} \sin Hz \quad [29]$$

$$y_B = d_{horizontale} \cos Hz \quad [30]$$

Or, ce n’est pas la $d_{horizontale}$ qui est mesurée par le tachéomètre mais la distance oblique ($d_{oblique}$).

$d_{horizontale}$ est déduite de la $d_{oblique}$ via l’angle vertical V :



En pratique, on ne vise pas directement le point B (sauf quand on utilise le laser) mais un prisme situé à une hauteur h_{prisme} à la verticale du point B. Dès lors l’altitude du point B, par rapport au tachéomètre est déterminée par :

$$z_B = d_{oblique} \cos V - h_{prisme} \quad [31]$$

Les coordonnées (x_B, y_B, z_B) ont ainsi été déterminées uniquement sur base de mesures d’angles et de distances.

11.2.2. Concept d’erreur

Toute mesure est entachée d’erreurs. Par définition, l’erreur (ϵ) est la différence entre la valeur mesurée (y) d’une quantité et de sa valeur réelle (μ).

$$\epsilon = y - \mu$$

Il existe trois types d’erreur (Billen, 2014) :

- les erreurs grossières qui sont engendrées par le manque de soin, l’observateur ou un oubli. Elles sont à proscrire ;
- les erreurs systématiques, qui souvent suivent des lois physiques et peuvent donc être modélisées pour être corrigées (axes du tachéomètre déréglés, ...) ;
- les erreurs aléatoires constitue le reste de la part d’erreur. Elles suivent généralement une distribution normale. Il est possible de les estimer.

Dans ce travail, trois erreurs systématiques sur les angles seront corrigées via la technique du double retournement. Ces trois erreurs sont

- l’erreur de collimation horizontale engendrée par un défaut de perpendicularité entre l’axe de visée (O) et l’axe secondaire (T) ;
- l’erreur de tourillonnement engendré par un défaut de perpendicularité entre l’axe secondaire (T) et l’axe principal (P) ;
- l’erreur de graduation du cercle vertical.

Un double retournement consiste à pointer un objet dans deux positions du cercle vertical (cercle à gauche et cercle à droite), qui implique un pivotement de l’alidade de 200 gons autour de l’axe principal (premier retournement) et un basculement de la lunette autour de l’axe secondaire (deuxième retournement) (Association française de topographie, n.d.).

Sur le cercle horizontal, l’angle final déduit de ces deux lectures cercle à gauche et cercle à droite est

$$Hz = \frac{Hz_{CG} + modulo (Hz_{CD} - 200; 400)}{2} \quad [32]$$

Sur le cercle vertical, l’angle final déduit de ces deux mesures est

$$V = \frac{V_{CG} + (400 - V_{CD})}{2} \quad [33]$$

Une quatrième erreur systématique portant sur les mesures de distance est automatiquement corrigée via un module spécifique de la station totale. Les distances sont mesurées par un distance-mètre électronique équipant le tachéomètre. Le distance-mètre électronique envoie une onde électromagnétique vers le prisme qui la réfléchit.

La distance est L est déduite de

$$2L = c\Delta t$$

où c est la vitesse de la lumière

Δt est l’intervalle de temps séparant l’émission et la réception de l’onde.

En pratique, il est impossible de mesurer l’intervalle de temps suffisamment précisément pour obtenir une mesure précise de la distance. La solution est alors de déterminer ce temps via le déphasage entre deux signaux.

L’erreur systématique sur la mesure de distance qui nous intéresse est engendrée par l’influence de la température, de la pression et de l’humidité de l’air sur la propagation des ondes électromagnétiques. La correction de cette erreur est directement réalisée par le tachéomètre. Notons que ces erreurs ont de l’importance sur de longues distances, ce qui ne sera pas le cas dans ce travail.

A l’issue de ces corrections, et considérant une absence d’erreurs grossières, ne restent que les erreurs aléatoires qui supposons le, suivent une distribution normale.

Le constructeur fournit la écarts-types sur les mesures directes : les mesures d’angle (σ_{Hz} et σ_V) et la mesure de distance (σ_D) qui sont indépendantes. La mesure des coordonnées est fonction de ces deux types de mesure. Dès lors l’incertitude est propagée.

L’équation générale de propagation d’erreurs appliquée à une fonction Z est la suivante :

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2}$$

Pour les coordonnées x , y et z , les écarts-types associés sont donnés par :

$$\sigma_x = \pm \sqrt{(\cos Hz \sigma_D)^2 + (D \sin Hz \sigma_{Hz})^2}$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{(\sin Hz \sigma_D)^2 + (D \cos Hz \sigma_{Hz})^2}$$

$$\sigma_z = \pm\sqrt{(\sin V \sigma_D)^2 + (D \cos V \sigma_V)^2} \quad [34]$$

Les distances oblique est horizontale sont assimilées à D. En outre, l’erreur sur la hauteur de prisme n’est pas prise en compte.

11.2.3. Changement de référentiel

Les coordonnées sont exprimées dans un référentiel dont l’origine est définie par l’intersection entre l’axe optique (O) et de l’axe principal (P) du tachéomètre. Ce référentiel est défini par :

- l’axe Z qui est vertical ;
- l’axe Y qui est arbitraire mais fixe et perpendiculaire à Z ;
- l’axe X qui est perpendiculaire aux deux autres axes.

Les coordonnées obtenues peuvent être exprimées dans un référentiel plus adapté à l’expérience. L’origine d’un tel référentiel serait par exemple le coin droit du bassin en amont de la retenue d’eau à hauteur du sol.

- L’axe Z serait vertical ;
- l’axe X serait parallèle au muret droit du bassin et perpendiculaire à Z
- l’axe Y serait perpendiculaire aux deux autres axes (transversal par rapport à la retenue d’eau).

La *figure 44* illustre la transposition entre les deux référentiels. D’une part, les 3 composantes de la translation entre les deux origines des deux référentiels (t_x, t_y, t_z) et d’autre part l’angle, de rotation autour de l’axe Z doivent être connus.

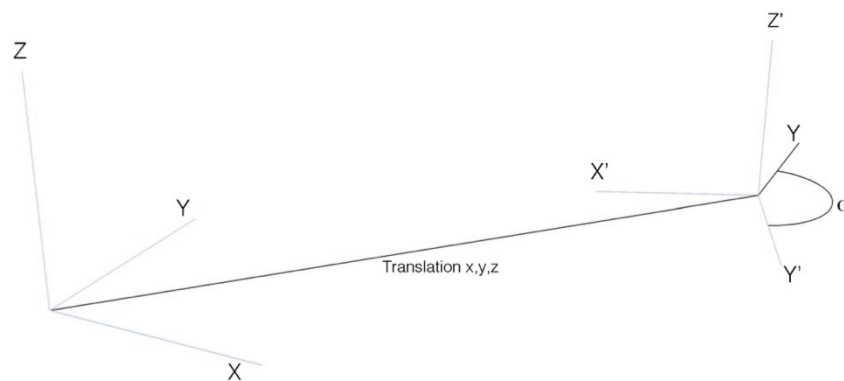


Figure 44 - Changement de référentiel

Les translations et rotation à appliquer à chacune des coordonnées obtenues lors du levé pour les obtenir dans le nouveau référentiel (X', Y', Z') est décrite par le système :

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

Les coordonnées-mondes étant définies dans le nouveau référentiel, les points restitués par les algorithmes de la DLT seront eux aussi exprimés dans ce référentiel.

11.2.4. Campagne de levé

11.2.4.1. Matériel

La liste du matériel utilisé pour l’expérience est présentée dans cette section :

- Un tachéomètre, LEICA TPS1202+, dont les caractéristiques de précision selon les normes ISO 17234-4 et ISO 12234-3 sont reprises dans le *tableau 13*.

Tableau 13 - Caractéristiques de précision

	Ecart-type (ISO 17123- 3 et 4)
Distance	1mm + 1,5 ppm (mode std : 2,4s)
Angle V et Hz	2" (0,6 mgon)

Source : Leica Geosystems AG, 2009

Ces données seront utiles pour quantifier l’erreur sur les coordonnées obtenues.

- Un mini-prisme + porte prisme de hauteur réglable ;
- 3 cibles réfléchissantes autocollantes ;
- un trépied ;
- une embase ;
- une araignée.



Figure 45 - Tachéomètre, mini-prisme, cible autocollante, embase.

Source :Leica Geosystems AG, 2009

11.2.4.2. Description du levé des PC et PV

Le premier élément à considérer est l’emplacement du tachéomètre. Ce choix est dicté par deux critères :

- il est préférable d’effectuer les mesures à partir d’un seul emplacement de station afin de rester dans un système cohérent et d’éviter les erreurs dues aux rattachements entre plusieurs stations ;
- l’emplacement doit être stable pour éviter les mouvements de la station en cours de levé.

Un emplacement idéal a rapidement été détecté. L’ensemble des PC et PV est visible depuis celui-ci et il est situé sur un promontoire en béton, considéré comme stable. Le désavantage des

surfaces lisses et dures comme le béton est qu’il est impossible d’enfoncer les trépieds sur lesquels repose la station totale. Une solution efficace est l’utilisation « d’une araignée » qui permet de fixer les pieds entre eux.

La mise en station de l’appareil passe par la mise en coïncidence de l’axe principal avec la verticale locale du lieu (représentée par le fil à plomb) ce qui engendre la coïncidence automatique de l’axe secondaire avec l’horizontale. En pratique, l’horizontalité de la station est effectuée d’abord grâce à une nivelle sphérique présente sur l’embase ainsi qu’une nivelle plus précise incorporée dans la station totale. En outre, un système de compensateurs corrige en tout temps une erreur d’horizontalité comprise dans une gamme définie.

Ensuite, trois cibles réfléchissantes autocollantes sont fixées sur des parois verticales les plus éloignées possible et autour de la station. Ces cibles ont deux buts :

- vérifier la stabilité de la station durant l’expérience en mesurant la position des cibles en début et en fin de levé (*tour d’horizon*);
- par mesure de précaution, si une deuxième campagne avait dû être effectuée, la présence de ces trois cibles aurait permis de se « recalcr » dans le système de référence (*station libre*).

Préalablement à la campagne de mesure, une codification avait été imaginée. Elle avait pour but d’associer à chaque prise de mesure un code permettant de décrire l’objet de cette mesure. La codification utilisée est présentée dans le *tableau 14*.

Tableau 14 - Codification

Objet	Code
Cible réfléchissante	700
Point de calibration temps initial	100
Point de vérification temps initial	101
Point de calibration temps final	102
Point de vérification temps final	103
Muret	201
Point de niveau	185
Canon 50d	301
Kodak	302
Sony NEX-6	303
Canon 400d	304

Ensuite, pour chaque point à lever, une mesure cercle à gauche et à droite est effectuée pour se débarrasser d’une série d’erreurs systématiques. Les visées se font en direction du mini-prisme. Une nivelle sphérique est présente sur le porte prisme afin d’assurer que le mini-prisme soit situé à la verticale du point à mesurer. La hauteur verticale du mini-prisme au dessus du point est déterminée par le nombre de rallonges du porte-prisme. Chacune d’elle mesure 10cm. Le

mini-prisme est systématiquement fixé à une hauteur minimale afin de diminuer l’erreur engendrée par une non-verticalité de celui-ci.

A l’issue de la campagne de prise de mesure, trois fichiers sont exportés du tachéomètre: le premier reprenant les données relatives à l’expérience au temps initial, le second reprenant les données relatives à l’expérience au temps final et le troisième reprend certaines éléments de la scène (position des murets, des appareils photo,...). La structure de ces fichiers est la suivante :

Tableau 15 - Structure des fichiers d’exportation.

Id	Code	Hauteur du prisme (m)	Angle horizontal (gons)		Angle vertical (gons)		Distance oblique (m)	
			Cercle à gauche	Cercle à droite	Cercle à gauche	Cercle à droite	Cercle à gauche	Cercle à droite
1								
2								
...								

A noter que la station dispose d’un module automatique de calcul des coordonnées. Cependant, le traitement des données est effectué manuellement afin d’avoir un contrôle du processus.

11.2.5. Traitement des données et résultats

A partir des données brutes et à partir des équations [32], [33] et [31], les angles horizontaux, verticaux et la distance oblique moyenne sont calculées pour chaque point. Les coordonnées x, y et z de ceux-ci sont calculées à partir des équations [29] et [30]

En outre, la précision de ces mesures est déterminée via les équations [34]. Les écarts-types moyens sur l’ensemble des mesures sont, selon x, y et z sont :

σ_x (mm)	2
σ_y (mm)	1
σ_z (mm)	2

Les résultats du levé au temps initial et au temps final sont représentés aux figures 46 et 47. Ces plans de situation permettent d’apprécier la répartition des PV et PC, l’emplacement des appareils photographiques et du tachéomètre.

En outre, l’ensemble des résultats de la campagne de levé est présenté en *annexe numérique*.

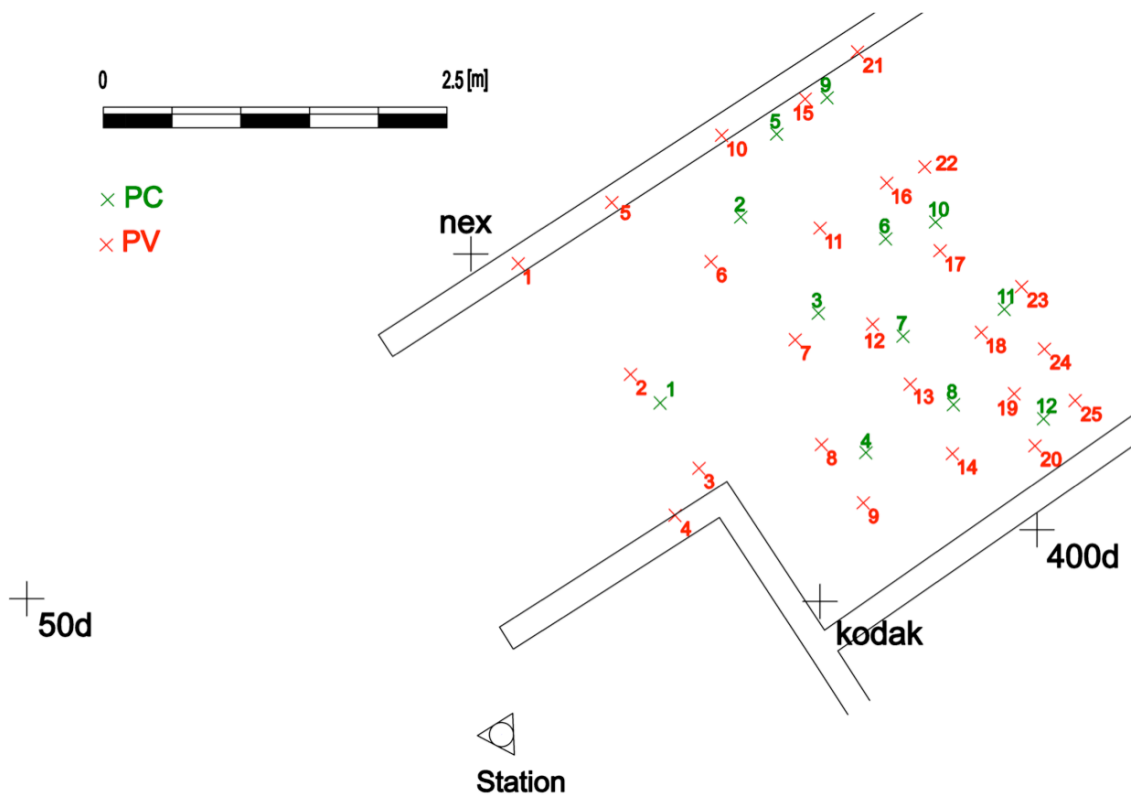


Figure 46 - Plan de situation, temps initial.

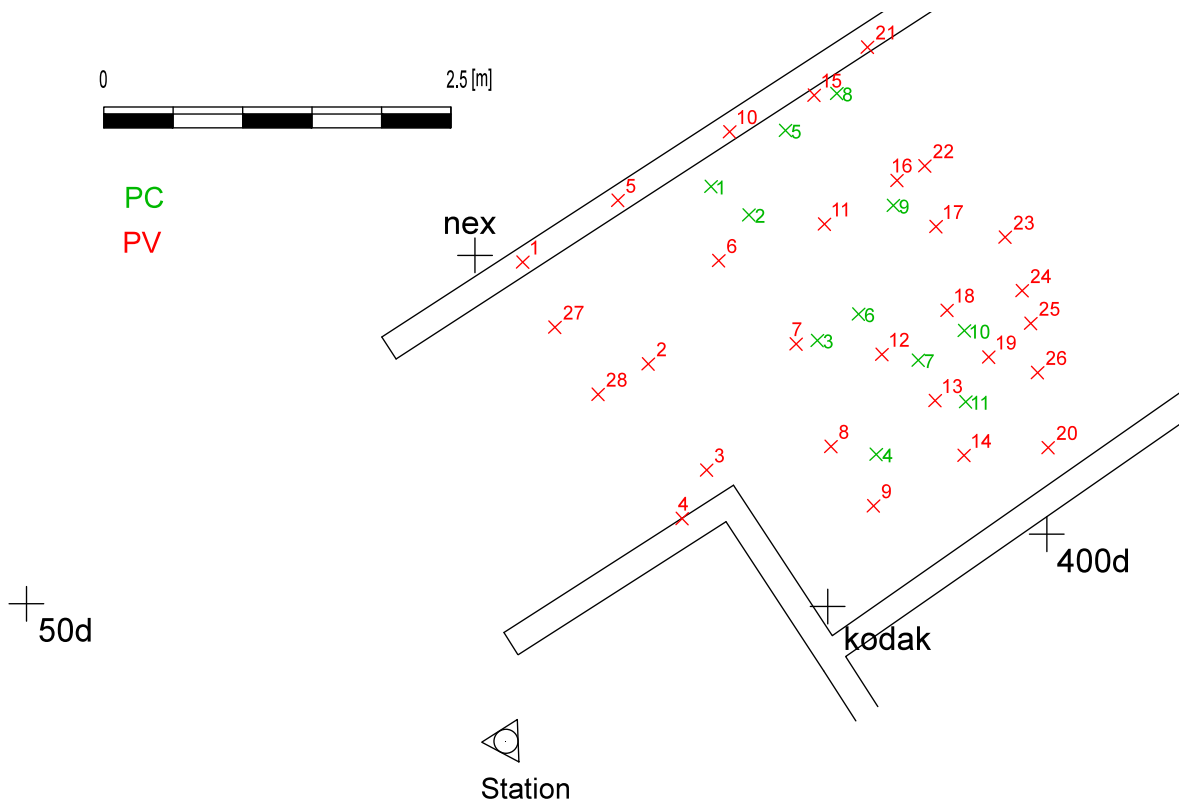


Figure 47 - Plan de situation, temps final.

11.3. ACQUISITION DES IMAGES

Quatre appareils photographiques différents sur trépied sont utilisés pour l’acquisition d’images. Leurs caractéristiques techniques principales sont présentées au *tableau 2*.

La différence notable entre ces appareils photographiques concerne la résolution de l’image. Elle affectera principalement la précision de la digitalisation : un pixel représentera une plus petite partie du monde lorsque la résolution est plus fine, la digitalisation sera dès lors plus fine.

L’utilisation de quatre appareils photographiques sur trépied se justifie si la restitution se veut être dynamique. En effet dans un cas statique, un seul appareil photo peut être utilisé pour obtenir des clichés depuis plusieurs points de vue (comme lors de l’expérience sur la maquette « Lego »).

La zone à restituer étant la partie aval de la retenue d’eau, les 4 appareils visent cet endroit. Plusieurs éléments expliquent la disposition des photographies telle qu’elle est présentée à la *figure 47* :

- obtenir des clichés de la scène selon des points de vue assez différents pour augmenter le rapport B/Distance à la scène;
- placer les trépieds sur des zones jugées stables, sûres pour les appareils photographiques et à partir desquelles la scène entière est observée;
- obtenir une représentation de la scène la plus large possible dans les clichés, ce qui nécessite en parallèle un réglage de la focale.

Ainsi, le Canon 400d, le Kodak et le Sony nex-6 sont disposés sur les flancs de la scène et le plus proche possible de celle-ci. La focale est réglée au minimum pour obtenir l’entièreté de la scène. Le Canon 50d quant à lui est placé face à la scène. Il a cependant dû être écarté de celle-ci pour éviter la zone d’évacuation des eaux. La focale de son objectif est réglée de manière à obtenir une représentation de la scène la plus large possible dans le cliché.

En ce qui concerne l’éclairage de la scène, aucun dispositif spécifique n’est prévu. La lumière naturelle et l’éclairage du laboratoire sont jugés suffisant.

Les réglages des appareils photographiques sont repris dans le *tableau 16*. Ils sont bien sûr fixés du temps initial au temps final.

Tableau 16 - réglages des appareils photographiques

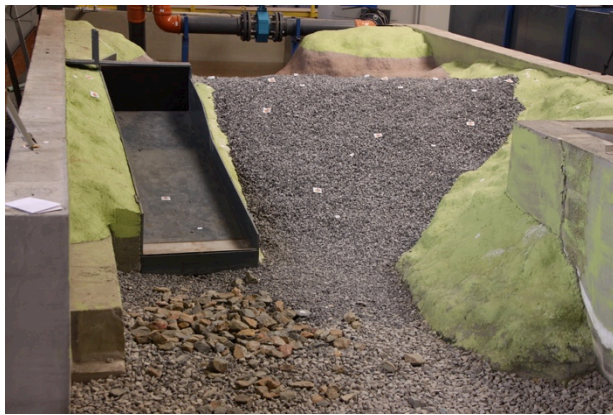
	nex	400d	50d	kodak
focale (mm)	16	18	38	5.85
ISO	320	200	200	200
Ouverture	f/4	f/9	f/7,1	f/6,3
Vitesse (s)	1/60	1/25	1/25	1/40

En théorie et dans le cas statique, les appareils étant fixés sur des trépieds, la vitesse d’obturation peut être grandement augmentée sans craindre un flou de bougé de l’appareil (diminution du temps de pose). Ceci aura pour avantage d’obtenir une grande quantité de lumière et donc, a priori, une bonne exposition de la scène. En outre, puisque le temps de pose est long, on peut se permettre de diminuer l’ouverture du diaphragme ce qui a pour effet d’augmenter la profondeur de champ (tout en veillant à ce que la scène reste bien exposée).

Finalement la sensibilité ISO est réglée relativement bas pour ne pas engendrer de bruit numérique. Ces réglages sont valables dans un cas statique, puisque tout est fixe sur la scène.

Dans un cas dynamique, le temps de pose doit être diminué au maximum (en fonction de la vitesse des éléments sur la scène). On ne peut trop ouvrir le diaphragme sous peine de diminuer la profondeur de champ. Dès lors, la sensibilité ISO doit être augmentée pour que la scène soit suffisamment exposée. Le risque lié à l’augmentation de la sensibilité est de voir apparaître du bruit numérique qui diminue la qualité technique de l’image.

Les 8 clichés obtenus aux temps initial et final sont présentés aux *figures 48 et 49* (Ceux-ci, avec la numérotation des PC et PV sont aussi présents en *annexe numérique* afin de mieux les apprécier).



Canon 50d



Canon 400d



Kodak EasyShare



Sony Nex-6

Figure 48 - Les quatre clichés au temps initial.



Canon 50



canon 400d



Kokad EasyShare



Sony Nex-6

Figure 49 - Les quatre clichés au temps final.

Deux éléments imprévus justifient le rendu plus sombre de la série de clichés du temps final (figure 49):

- l’humidité des cailloux ;
- la luminosité plus faible de fin de journée.

Cependant, un léger ajustement de l’exposition résout ce léger problème.

11.4. DETERMINATION DES COORDONNEES-IMAGES (DIGITALISATION)

De la même manière que pour les PV et PC de la maquette « Lego », les coordonnées-images sont obtenues via le logiciel XnView. Pour chacune des photos et chacun des PC et PV, les coordonnées-images sont acquises et répertoriées dans des tableur.xlsx (Annexe numérique).

Certaines cibles ne sont pas visibles depuis tous les points de vue. Lorsque c’est le cas, une ligne du tableau lui est toutefois consacrée. Elle doit simplement être remplie de -1. Les programmes MATLAB développés permettent de gérer ces lignes de -1.

12. CALIBRATION DES CLICHES

12.1. INTRODUCTION

Le programme de calibration *Calibration_DLT_16p* est appliqué aux données issues du protocole d’acquisition de données. En résumé, ces données sont :

- les coordonnées-mondes des PC aux temps initial et final;
- les coordonnées-images des PC pour les 4 clichés au temps initial ;
- les coordonnées-images des PC pour les 4 clichés au temps final ;

En outre, en additionnant les PC du temps initial au temps final, on obtient un autre set de données. Dès lors, pas moins de 12 configurations (4 calibrations au temps initial, 4 calibrations au temps final et 4 calibrations au temps initial + final) sont testées.

12.2. RESULTATS ET ANALYSES

12.2.1. Temps initial

Pour le temps initial, les 4 calibrations présentant des résultats fort similaires, seule la calibration du cliché issu du Canon 50d sera détaillée. Cette analyse est structurée comme celle qui avait été produite pour la maquette « Lego ». D’abord la stabilisation des paramètres L_i est examinée via l’évolution de l’indice de convergence ensuite, les RMSE et RGC sont présentés et analysés. Rappelons que le Résidu Global de Calibration (RGC) est calculé via [18] et représente simplement un résidu planimétrique par PC exprimé en pixels.

L’analyse du graphique (*figure 50*) montre la nette convergence des 16 paramètres L au-delà de la 41^{ème} itération. Les paramètres L, résultats principaux de l’algorithme sont jugés stables.

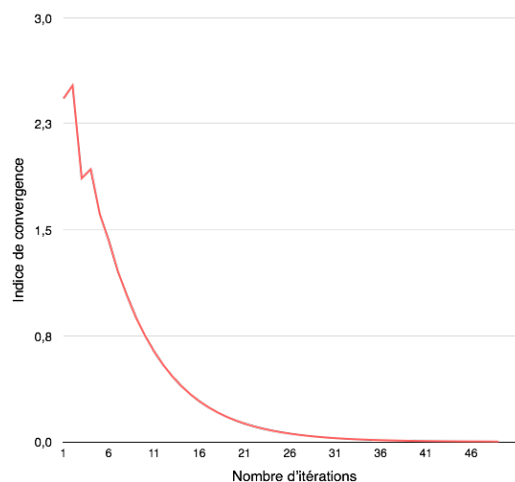


Figure 50 – Evolution de l’indice de convergence - Canon 50d - temps initial.

Les RGC avec et sans prise en compte de la modélisation des distorsions optiques, obtenus pour chacun des points de calibration présents dans la photographie sont représentés graphiquement (*figure 51*). Les PC sont classés selon leur écart au point principal du cliché.

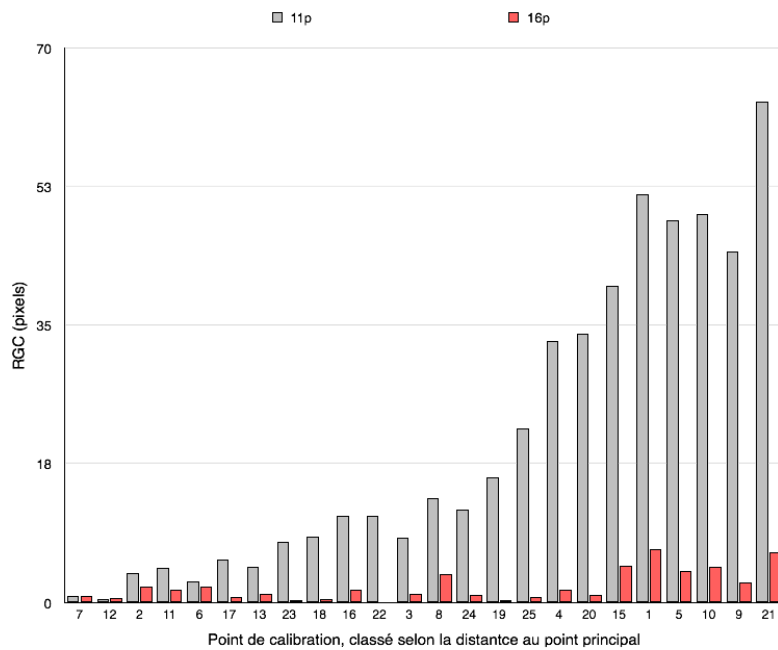


Figure 51 - RGC (en pixels) par PC avec et sans prise en compte des distorsions optiques – Canon 50d – Temps initial.

Cette figure montre clairement l’erreur systématique engendrée par les distorsions optiques. Elle démontre aussi l’effet de la correction apportée par la modélisation de ces distorsions. Visuellement, l’algorithme est donc jugé aussi efficace que lors de son application sur la maquette « Lego ». Pour les points 1, 5, 10, 9 et 21 (figure 46) le RGC est plus important que pour les autres PV. Ces erreurs sont soit engendrées par une modélisation des distorsions pas totalement efficace ou encore par une erreur de digitalisation due à une orientation non optimale des cibles par rapport à l’appareil photographique.

En outre, le tableau 17 suivant, représentant les RMSE obtenues via les algorithmes à 11 et à 16 paramètres confirme l’efficacité de l’algorithme et la qualité de la calibration pour cette prise de vue. En effet, la RMSE est 10 fois moindre lorsque les distorsions optiques sont modélisées et la dispersions des RGC tenue.

Tableau 17. - Résultats de la calibration, Canon 50d, Temps initial

	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p
RMSE (pixels)	20,6	2,0
Ecart-type (pixels)	19,3	1,9

L’application du programme de calibration sur les 3 autres prises de vue au temps initial aboutit à une qualité de calibration similaire. Les résultats sont résumés dans le tableau 18 suivant.

Tableau 18 - Tableau de synthèse de calibration des clichés au temps initial.

	50d		400d		kodak		Nex	
	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p
RMSE	20,6	2,0	28,5	0,8	33,1	0,7	9,8	1,8

(pixels)								
Ecart-type (pixels)	19,3	1,9	24,8	0,6	27,0	0,5	11,5	1,2

La RMSE relativement plus faible obtenue via le programme *Calibration_DLT_11p* pour l’appareil Sony NEX-6 est expliquée par l’activation du module interne de correction des distorsions.

Les distorsions optiques issues de l’appareil photographique Kodak sont représentées sur le cliché afin de percevoir qualitativement le déploiement de celles-ci (*figure 52*).

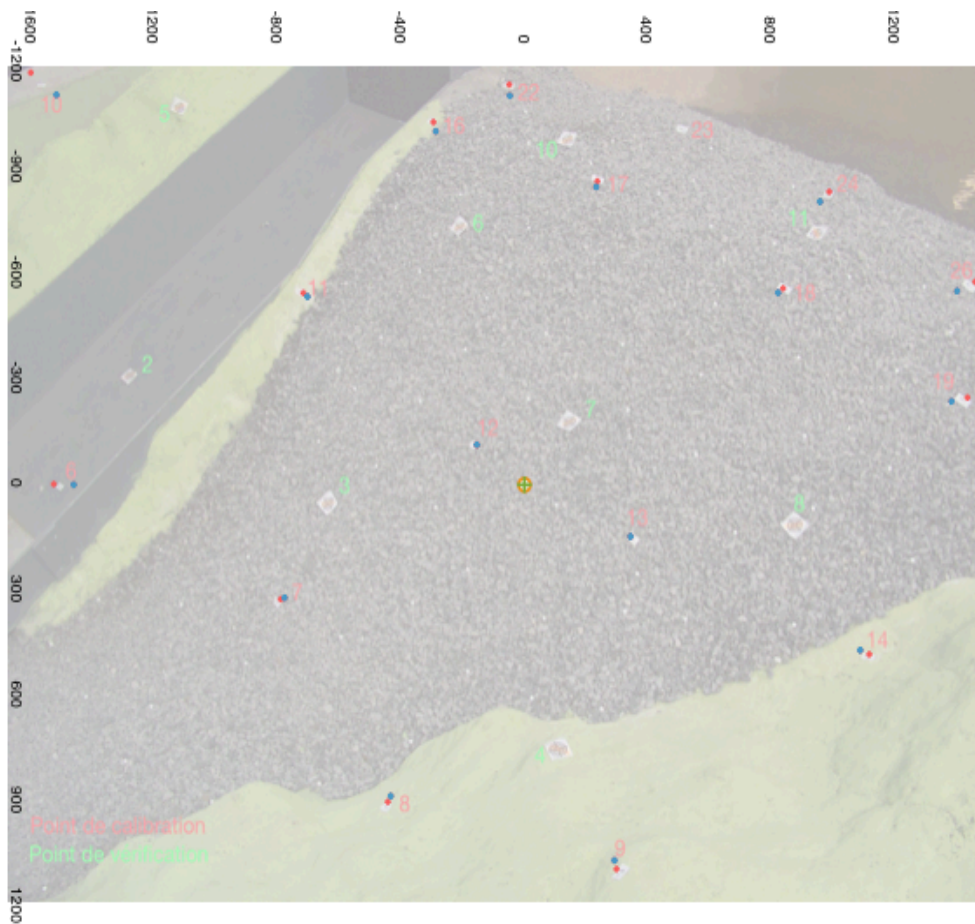


Figure 52 - Déploiement des distorsions optiques, kodak, temps initial.

Les points bleus sont les re-projections des PC par l’algorithme de calibration lorsque la modélisation des distorsions optiques n’est pas prise en compte lorsque les points rouges sont les PC reprojétés lorsque ces distorsions sont modélisées. En outre, la croix verte représente le point principal de la photo (0, 0), l’origine de la distorsion.

Qualitativement, les points rouges sont correctement re-projetés sur les cibles de calibration alors que les points bleus « tombent » systématiquement en deçà de celles-ci. Cette erreur est orientée en direction du point principal et est d’autant plus importante que le point est éloigné de celui-ci.

12.2.2. Temps final

Le programme de calibration est appliqué aux quatre prises de vue au temps final de la rupture par surverse. Aucun problème de convergence des paramètres L n’est à déplorer. Les RMSE et les écarts-types sont présentés pour chaque cliché au tableau 19 suivant :

Tableau 19 - Résultats de la calibration, temps final.

	50d		400d		kodak		Nex	
	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p
RMSE (pixels)	15,0	1,2	35,1	1,5	29,3	1,1	13,1	2,4
Ecart-type (pixels)	15,4	0,8	27,2	1,3	25,0	1,3	15,5	2,2

Les résultats obtenus révèlent une bonne qualité de la calibration pour chacun des clichés avec des RMSE comprises entre 1,1 et 2,4 pixels alors qu’elles sont plus importantes en utilisant le programme *Calibration_DLT_11p*. En outre, les écarts types confirment une dispersion contrôlée des RGC.

12.2.3. Temps final + temps initial

Le programme de calibration est appliqué au dernier ensemble de données : PC temps initial + PC temps final.

Un problème est survenu au cours de l’expérience. En effet, le Canon 400D ainsi que le Sony nex-6 ont été légèrement déplacés entre le temps initial et le temps final. Une mauvaise stabilité des trépieds en est sûrement la cause. Si l’expérience devait être réappliquée, une attention très particulière serait portée pour rendre les appareils photos les plus stables possible afin d’éviter un tel désagrément.

Une manière de se convaincre du mouvement de ces caméras est la comparaison de coordonnées-images d’éléments fixes entre les deux clichés. Une série de PC répond à ce critère. Les coordonnées-images de ceux-ci sont comparées entre le temps initial final. Les valeurs moyennes de ces écarts sont reprises dans le *tableau 20*.

Tableau 20 - Comparaison des PC fixes

	50d	kodak	400d	nex
Ecart moyen entre temps initial et temps final (pixels)	0	2	71	22

Cette analyse montre des écarts presque inexistantes pour le kodak et le 50d, indiquant leur immobilité entre la prise de clichés. Par contre, les résultats montrent que le 400d et dans une moindre mesure, le Nex ont bougé.

Le programme de calibration est cependant appliqué aux quatre prises de vue. Les résultats sont reportés dans le *tableau 21* :

Tableau 21 - Résultats de la calibration, temps final + temps initial.

	50d		400d		kodak		Nex	
	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p	Calibration_DLT_11p	Calibration_DLT_16p
RMSE (pixels)	18,5	1,8	277,7	55,1	33,1	1,8	144,9	19,6
Ecart-type (pixels)	17,9	1,7	200,5	31,1	27,0	0,9	158,0	12,7

Alors que les RMSE sont d’un ordre de grandeur habituel pour le 50d et le Kodak, elles sont relativement importantes pour les caméras instables entre le temps initial et le temps final.

13. RESTITUTION DE LA SCENE

13.1. INTRODUCTION

La restitution des PV est effectuée via l’algorithme *Resitution_DLT_16p*. Ce programme demande en entrée les données suivantes :

- les paramètres L des caméras utilisées ;
- la position des points principaux des clichés ;
- Les coordonnées-images dans les différents clichés des points à restituer (les PV à ce stade),
- Les coordonnées-mondes des PV, pour contrôler la qualité de la restitution au temps initial et au temps final.

Comme pour la section relative à la calibration, celle-ci sera divisée en 3 parties. La restitution sera d’abord effectuée pour les clichés du temps initial, ensuite les clichés du temps final et enfin ceux du temps final + temps initial malgré les défauts de stabilité rencontrés.

L’évaluation de la précision d’un MNS construit dans cette configuration sera analysée via l’analyse des RGR et des RMSE obtenus. Rappelons qu’un RGR, représentant la distance entre le PV mesuré et ce même PV restitué par l’algorithme est obtenu par [19].

13.2. RESULTATS ET ANALYSES

13.2.1. Temps initial

Les RGR par PV (exprimés en mètre), le nombre d’appareils photographiques utilisés pour restituer ces points ainsi que la RMSE et les écarts-types sont présentés dans le tableau 22 pour l’expérience au temps initial.

Tableau 22 - Résultats de la restitution, temps initial.

PV	RGR (m)	Nombre de caméras
1 ini	0,006	2
2 ini	0,001	4
3 ini	0,000	4

4 ini	0,001	4
5 ini	0,002	4
6 ini	0,002	4
7 ini	0,001	4
8 ini	0,001	4
9 ini	0,002	3
10 ini	0,001	4
11 ini	0,001	4
12 ini	0,003	2
RMSE (m)	0,002	
Ecart-Type	0,002	

Premier élément d’importance, la RMSE vaut 2 mm. Cette erreur très faible indique d’ores et déjà qu’une restitution de la scène au temps initial respecterait la taille des graviers calcaires d’un calibre 7-14 mm.

On observe cependant, en analysant les RGR par PV, que le point 1 et 12 montrent des erreurs plus élevées. Ceci est probablement dû à deux facteurs défavorisant (*figure 46*):

- ils sont restitués avec 2 prises de vue, le strict minimum pour résoudre le système d’équations ;
- ils sont disposés à la limite de la zone couverte par les PC.

Impossible de déterminer quelle est la raison la plus déterminante pour expliquer ces RGR légèrement plus élevés par rapport aux autres.

13.2.2. Temps final

Le programme de restitution est appliqué pour les PV au temps final. Les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau 23*.

Tableau 23 - Résultats de la restitution, temps final.

	RGR (m)	Nombre de caméras
1-final	0,001	4
2-final	0,002	4
3-final	0,001	4
4-final	0,001	4
5-final	0,001	4
6-final	0,001	4
7-final	0,003	4
8-final	0,001	3
9-final	0,001	4
10-final	0,002	4
11-final	0,001	4
RMSE (m)	0,001	
Ecart-Type	0,001	

(m)		
-----	--	--

La RMSE atteinte cette fois est le millimètre avec un écart type d’un millimètre. La restitution peut être qualifiée d’excellente. La légère différence par rapport au temps initial est la prise en compte plus systématique des 4 appareils photos, ainsi qu’une disposition des PV plus interne à la zone de calibration (*figure 47*).

Pour évaluer si le nombre de prises de vues retenues pour la restitution expliquerait une diminution de l’erreur de restitution, le programme est appliqué à trois configurations de prise de vues différentes:

- 3 prises de vue : 50d, nex et 400d ;
- 2 prises de vue : 50d et 400d ;
- 2 prises de vue : 50d et nex ;

Les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau 24*.

Tableau 24 - Configuration de prises de vue différentes, temps final.

	50d + nex + 400d	50d + 400d	50d + nex
RMSE (m)	0,001	0,001	0,002
Ecart-Type (m)	0,001	0,001	0,001

Les résultats n’indiquent pas de relation directe entre le nombre de prises de vues et la RMSE et l’écart-type. Cependant, l’utilisation d’un plus grand nombre de prises vues permet l’obtention de résultats plus fiables grâce à la redondance des observations et l’utilisation des moindres carrés.

13.2.3. Temps initial + temps final

A propos du volume de calibration

La prise en compte des PC au temps final et au temps initial avait permis de définir un volume de calibration indispensable si l’application se voulait dynamique. La preuve de l’utilisation d’un tel volume de calibration pour une restitution dynamique est l’objet des paragraphes suivants.

Si les PV du temps initial sont restitués avec les paramètres de calibration du temps final, la RMSE est de 37 mm (*tableau 25*).

Tableau 25 – Restitution des PV du temps initial avec la calibration du temps final et Restitution des PV au temps final avec la calibration du temps initial..

	Restitution des PV initiaux avec la calibration au temps final	Restitution des PV finaux avec la calibration au temps initial
RMSE (m)	0,037	0,036
Ecart-Type (m)	0,014	0,013

Ces erreurs de restitution ne respectent pas la gamme de précision souhaitée pour la restitution des éléments constitutifs de la retenue d’eau (calibre 7 à 14 mm).

Si seule la calibration au temps final est effectuée, la précision de restitution de l’ensemble des points restitués entre le temps initial et le temps final devrait se situer entre 1mm (*tableau 23*) et 37mm (la précision de restitution augmentant au fur et à mesure de l’expérience).

Inversement, si les PV du temps final sont restitués en utilisant les paramètres de calibration du temps initial, la RMSE est de 36 mm (*figure 25*). La précision de restitution diminuerait alors au fur et à mesure de l’expérience (de l’érosion de la partie avale).

Voici donc la preuve qu’un volume de calibration englobant non seulement spatialement mais aussi temporellement les points à restituer est indispensable.

Résultats de la restitution

La restitution suivante intègre cette dernière conclusion. Elle restitue les PV du temps initial et du temps final en prenant en compte les paramètres de calibration des points de vue effectuée via les PC du temps initial et du temps final.

Bien que la calibration des appareils nex et 400d ne soit pas de très bonne qualité à cause de leur instabilité en cours d’expérience (*section 12.2.3*), une restitution est toutefois tentée. Les RGR par PV, la RMSE et le nombre de clichés utilisés sont reportés au *tableau 26*.

Tableau 26 - Résultats de la restitution (4 appareils photographiques).

PV	RGR (m)	Nombre de clichés
1- initial	0,043	2
2- initial	0,014	4
3- initial	0,016	4
4- initial	0,008	4
5- initial	0,007	4
6- initial	0,013	4
7- initial	0,017	4
8- initial	0,005	4
9- initial	0,011	3
10- initial	0,005	4
11- initial	0,004	4
12- initial	0,002	2
1 - final	0,012	4
2- final	0,008	4
3- final	0,003	4
4- final	0,006	4
5- final	0,018	4
6- final	0,002	4
7- final	0,005	4
8- final	0,062	3
9- final	0,011	4
10- final	0,011	4
11- final	0,013	4
RMSE (m)	0,013	

Ecart-type (m)	0,014	
-----------------------	-------	--

Il en ressort une RMSE de 13 mm et un écart type de 14mm. Ce résultat, considérant le problème du mouvement des caméras n’est pas aussi mauvais qu’imaginé mais ne respecte pas la gamme de précision souhaitée. A noter que deux PV sont très mal restitués : PV1-initial et PV-8 final. L’explication est leur proximité avec la bordure de la zone de calibration (*figure 46 et 47*).

Dans le but d’augmenter la précision de la restitution, les clichés issus des appareils photographiques instables sont écartés (nex et 400d). Ainsi, seul le kodak et le 50d sont utilisés pour la restitution. Cependant, ce nombre restreint de clichés entraîne l’indétermination des positions de 4 PV non présents dans ces deux clichés (*tableau 27*).

Tableau 27 - Résultat de la restitution (temps final + temps initial) (Kodak + 50d)

PV	RGR (m) 50d + kodak	RGR (m) 50d+kodak+ nex+400d
1- initial	-	-
2- initial	0,001	0,014
3- initial	0,002	0,016
4- initial	0,002	0,008
5- initial	0,004	0,007
6- initial	0,002	0,013
7- initial	0,002	0,017
8- initial	0,002	0,005
9- initial	-	-
10- initial	0,001	0,005
11- initial	0,003	0,004
12- initial	-	-
1 - final	0,003	0,012
2- final	0,001	0,008
3- final	0,001	0,003
4- final	0,000	0,006
5- final	0,004	0,018
6- final	0,001	0,002
7- final	0,002	0,005
8- final	-	-
9- final	0,001	0,011
10- final	0,001	0,011
11- final	0,001	0,013
RMSE (m)	0,002	0,009
Ecart-type (m)	0,001	0,006

Sur base uniquement des PV restituables et de deux appareils photographiques stables, une RMSE de 2 mm est obtenue (*tableau 27*). Cette valeur ne peut être comparée à la RMSE de 13 mm obtenue au *tableau 26* puisque les PV considérés dans le calcul ne sont pas identiques. Dès lors, la RMSE obtenue avec les 4 clichés est recalculée en considérant les mêmes points restitués lors de l’expérience à deux clichés. La RMSE obtenue est de 9 mm (*tableau 27*). On peut désormais comparer les deux résultats et apprécier l’erreur très faible de la restitution obtenue en ne considérant que les caméras correctement calibrées.

Ce résultat garantit donc une restitution dans la gamme de précision souhaitée (inférieure à 7 mm) pour n’importe quel point du temps initial ou du temps final lorsqu’un volume de calibration est considéré. Cette conclusion est valable pour la zone délimitée par les PV considérés bien entendu mais peut probablement être étendue à la zone de calibration.

Cependant, et ceci est un élément très important de l’analyse, il est impossible de déterminer la précision obtenue pour un point obtenu à un temps t, entre le temps initial et le temps final et

situé dans le volume délimité par les PC. En effet puisqu’il est impossible de placer des PV en cours d’expérience, il est impossible de garantir une précision inférieure aux éléments constitutifs de la digue (RMSE impossible à calculer). La seule garantie qui peut être donnée est une erreur bien inférieure à 37 mm (*tableau 25*). Cependant, grâce à la présence du volume de calibration, nous sommes convaincu d’une faible erreur de restitution, il n’est pas possible de le vérifier.

Erreurs aléatoires artificielles

Nous avons considéré jusqu’à présent que la détermination des coordonnées-mondes et des coordonnées-images des PC et PV étaient exemptes d’erreurs aléatoires. En réalité, ce n’est pas probablement pas le cas.

Les coordonnées-mondes des points sont mesurées par le tachéomètre. Les écarts-types en x, y et z associés à la prise de ces mesures avaient été calculés à la *section 11.2.5*. Ils sont repris au tableau suivant :

σ_x (mm)	2
σ_y (mm)	1
σ_z (mm)	2

En ce qui concerne les coordonnées-images, elles sont issues d’opérations de digitalisation. Par expérience, la détection du centre des cibles se fait de manière certaine dans une fenêtre de 3x3 pixels. En toute rigueur, cette fenêtre de 9 pixels devrait varier en fonction de la résolution de l’appareil photographique employé, de sa position par rapport à la scène ainsi que de l’orientation des cibles et de leur éloignement par rapport à la caméra.

Dans un premier temps, une erreur aléatoire comprise dans cette fenêtre de 9 pixels est ajoutée aux coordonnées-images des points digitalisés. En pratique, le fragment de script MATLAB suivant est utilisé.

```

% Erreurs de digitalisation

for l=1:sizeindex
    a=-1;
    b=1;
    coi(1,1)=coi(1,1)+ round(a + (b-a)*rand);
    coi(1,2)=coi(1,2)+ round(a + (b-a)*rand);
end
    
```

Les clichés 50d et kodak sont alors calibrés en prenant en compte ces erreurs aléatoires ajoutées.

Dans un deuxième temps, le même type d’expérience est réalisé mais en ajoutant artificiellement \pm l’écart-type correspondant aux composantes x, y et z sur les coordonnées-mondes. En pratique, le script MATLAB suivant est utilisé.

```

for l=1:sizeindex
    a=-0.002;
    b=0.002;
    c=-0.001;
    d=0.001;
end
    
```

```

com(1,1)=com(1,1)+ round(a + (b-a)*rand);
com(1,2)=com(1,2)+ round(c + (d-c)*rand);
com(1,3)=com(1,3)+ round(a + (b-a)*rand);
end
    
```

Dans un troisième temps, l’erreur aléatoire de digitalisation ainsi que l’erreur aléatoire de détermination des coordonnées-mondes sont prises simultanément en compte pour effectuer la calibration des clichés kodak et 50d.

Les résultats de la propagation de ces erreurs dans les résultats de la restitution sont présentés au *tableau 28* :

Tableau 28 - Résultats de l’ajout artificiel d’erreurs sur la restitution 11p (temps final + temps initial) (Kodak + 50d).

	Sans erreurs ajoutées	Erreurs de digitalisation	Erreurs tachéomètre	Combinaison des erreurs
RMSE (m)	0,002	0,002	0,002	0,002
Ecart type (m)	0,001	0,001	0,001	0,001

L’analyse de ces résultats permet d’affirmer que l’ajout de ces erreurs aléatoires ne modifie pas suffisamment les résultats de la restitution pour pouvoir être détecté. L’algorithme est dès lors jugé robuste vis à vis des erreurs aléatoires pouvant être engendrées dans le processus.

Résidus selon x, y et z

Cette section s’intéresse brièvement à l’analyse des résidus selon les composantes x, y et z. Ces informations sont présentées dans le *tableau 29*.

Tableau 29 - Analyse des résidus (temps final + temps initial) (Kodak + 50d)

	en X	en Y	en Z
Moyenne des résidus (m)	-0,000	0,001	-0,000
Ecart-type (m)	0,001	0,001	0,001

Le résultat essentiel est que la moyenne des résidus indique l’absence de biais réellement décelables.

Comparaison DLT_Restitution-16p et DLT_restotution_11p

Enfin, les résultats présentés au *tableau 30* indiquent que la modélisation des distorsions optiques diminue la RMSE d’un facteur 10, résultats en faveur de l’utilisation du programme *DLT_Restitution_16p*.

Tableau 30 - Comparaison 16p - 11p (temps final + temps initial) (Kodak + 50d)

	16p	11p
RMSE (m)	0,002	0,023
Ecart-type (m)	0,001	0,022

14. ENSEIGNEMENTS DE L’APPLICATION AU MODELE REDUIT DE RETENUE D’EAU

La technique de la DLT a été appliquée au modèle réduit de la retenue d’eau. Le but principal était d’en évaluer la capacité à restituer la scène avant la surverse (temps initial) et après la surverse (temps final) dans une gamme de précision respectant la taille des éléments constitutifs de la retenue d’eau. En outre, une extension de cette technique a été imaginée afin qu’une restitution pour tout temps t , entre le temps initial et le temps final respecte également la gamme de précision précitée.

La démarche générale de validation de la DLT (*figure 14*) a été confrontée au modèle réduit de la retenue d’eau. Cette démarche est composée de trois parties principales : acquisition de données, implémentation (*DLT_Calibration_16p* et *DLT_Restitution_16p*), validation (PV et RMSE). Alors que l’implémentation et la technique de validation n’ont subi aucune modification depuis leur application sur la maquette « Lego », l’acquisition des données a dû être légèrement adaptée. Cette adaptation provient d’une part des caractéristiques dimensionnelles de la retenue d’eau mais aussi de la volonté d’étendre la théorie de la DLT à la dynamique.

Ainsi, ces adaptations sont :

- la matérialisation des PC et les PV par des cibles circulaires dont le but est double : pouvoir les identifier facilement dans les prises de vues et détecter leur centre précisément ;
- la distribution d’une série de PC et de PV au temps initial et au temps final pour définir un volume de calibration;
- les coordonnées-mondes de ces points sont obtenues par l’utilisation d’un tachéomètre ;
- quatre appareils photographiques sont disposés sur des trépieds. Ils sont déclenchés avant et après la rupture de l’ouvrage.

En statique, le protocole d’acquisition de données, les programmes *DLT_Calibration_16p* et *DLT_restitution_16p* développés se sont montrés très efficaces. En effet, à l’issue de la démarche, la précision de la restitution de la scène au temps initial ainsi qu’au temps final évaluée sur base de PV est de 2 mm, ce qui respecte amplement les 7 mm souhaités.

En ce qui concerne les considérations dynamiques, l’intérêt de définir un volume de calibration autour de la zone à restituer a été mis en exergue. En outre, l’instabilité de deux caméras entre le temps initial et le temps final a conduit à ne considérer pour la calibration et la restitution que les deux prises de vues stables. La précision obtenue sur base des PV visibles dans les 2 clichés est de 2 mm. Ce résultat ne peut être comparé à ceux obtenus en statique car certains PV n’ont pu être restitués. Cependant, on ne doute pas que si les 4 appareils photographiques étaient restés stables, les précisions auraient été similaires.

En outre, il a été démontré qu’il est impossible de juger de la qualité d’une restitution effectuée à un temps t , entre le temps initial et le temps final pour la simple raison qu’aucun PV n’est présent à ce temps. Grâce à la définition du volume de calibration, on peut toutefois s’attendre à des résultats proches des 2 millimètres.

Enfin, ci-dessous sont listés les paramètres influençant la précision des résultats :

- précision de la digitalisation ;
- précision de la détermination des coordonnées-mondes ;
- nombre d’appareils photographiques ;
- nombre et distribution des PC et des PV ;
- taille et orientation des cibles ;
- résolution des clichés ;
- distance entre appareils photographiques ;
- distance entre les appareils photographiques et la scène ;
- orientation des appareils photographiques ;
- modélisation des distorsions optiques.

L’évaluation de l’impact relatif engendré par chacun de ces paramètres est une tâche laborieuse et complexe. Pour accéder à ces informations, il aurait fallu imaginer un objet d’étude standardisé pour ensuite répéter les expériences en faisant varier un à un chacun des paramètres. Ce mémoire se voulant le plus appliqué possible, il a été préféré d’évaluer la DLT sur la maquette de retenue d’eau directement après les premières expériences sur la maquette « Lego ».

15. RECOMMANDATIONS POUR LA DYNAMIQUE.

L’extension de la DLT à la dynamique n’a pas pu être jugée apte en termes de précision à restituer la scène à un temps intermédiaire. Certaines recommandations sont toutefois formulées dans cette section si à l’avenir on voulait obtenir des restitutions du plan d’eau au cours du temps.

La mise en œuvre de cette extension à la dynamique implique principalement une modification de l’étape d’acquisition de données (*figure 14*).

Certaines recommandations sont formulées selon deux axes :

- l’acquisition continue d’images au cours de la rupture ;
- l’accès à la surface d’eau.

Acquisition d’images

Cela va de soi, la construction d’un MNS dynamique implique une acquisition continue d’informations.

Le choix de l’appareillage d’acquisition est effectué selon la vitesse du phénomène à restituer et la densité temporelle souhaitée. Plus le phénomène est rapide, plus la fréquence d’acquisition d’images doit être élevée. Cependant, un nombre plus important d’images entraîne un temps de traitement plus important.

Si le phénomène est rapide, l’utilisation d’un appareil vidéographique est recommandée. Les appareils photographiques modernes incluent presque systématiquement des modules vidéographiques très performants allant jusqu’à une acquisition de 60 images par seconde en « full HD » (1080 x 1920 pixels). La résolution étant plus faible, la précision de la restitution diminuera. D’un autre côté, si le phénomène est plus lent, une acquisition de « simples » photographies à intervalles de temps définis peut être suffisante. Elle aura pour avantage d’offrir certes une densité temporelle d’images plus faible mais dont la résolution (*tableau 2*) assurera une meilleure précision de restitution.

En outre, quels que soient les appareils employés, une synchronisation entre ceux-ci devra être assurée.

Pour garantir un temps raisonnable de traitement des images, certaines tâches devraient être automatisées, par exemple la détection automatique des points homologues pour chaque couple d’images à un temps donné.

Accès à la surface d’eau.

La détection de points homologues sur des surfaces d’eau pose problème car elle n’est pas assez texturée. Les pixels ne sont pas assez différents les uns des autres pour être bien mis en correspondance. Une solution à ce problème est la dissémination d’objets flottants de faibles dimensions et contrastés en cours d’expérience (l’utilisation de billes de polystyrène expansé d’un diamètre de 1mm est une première piste). Ces objets étant bien contrastés avec la surface d’eau, ils pourraient faciliter la détection des points homologues.

Protocole d’acquisition étendu à la dynamique

Enfin, voici le protocole imaginé pour étendre l’application de la DLT à la dynamique avec des appareils vidéographiques:

Lors de l’expérience :

- distribution spatiale de PC et de PV sur la scène au temps initial;
- détermination de leurs coordonnées-mondes (tachéomètre) ;
- positionnement et enclenchement des appareils vidéographiques stables;
- début de l’expérience ;
- dissémination continue en amont de billes de polystyrène expansé (frigolite) ;
- fin de l’expérience ;
- dissémination des PC et PV sur la scène au temps final ;
- détermination de leurs coordonnées-mondes (tachéomètre)

En traitement :

- synchronisation des images ;
- digitalisation des PC et PV aux temps initial et final ;
- calibration des prises de vue (*DLT_calibration_16p*);
- détection des coordonnées-images des points homologues pour chaque couple de clichés ;
- restitution de ces coordonnées-images (*DLT_restitutions_16p*) ;
- vérification de la qualité de la restitution ;

Ces recommandations sont relativement basiques mais laissent déjà entrevoir le long travail à accomplir pour étendre la démarche statique à la dynamique.

PARTIE IV – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

16. CONCLUSIONS

Les barrages, digues et retenues d’eau sont des ouvrages majeurs du monde moderne. Ils protègent en effet nombre de biens et de populations. Ils ont aussi un atout économique important. Cependant, leur vieillissement ainsi que leurs exposition à des évènements naturels extrêmes peuvent conduire à leur affaiblissement voire à leur rupture engendrant des dommages considérables tant matériels qu’humains. Ces phénomènes de formation de brèches et de ruptures par surverse sont relativement méconnus. Dès lors, la communauté scientifique s’efforce à comprendre ces processus par l’intermédiaire de modélisations numériques et physiques. Cependant, la validation et la calibration des modèles numériques sont rendues difficiles par l’absence ou la faible fiabilité des données issues des modèles physiques.

Le laboratoire HECE (Hydraulics Environmental and Civil Engineering) de l’Université de Liège participe activement à la compréhension de ces phénomènes mais manque de données spatiales et temporelles fiables issues de leurs modèles physiques. C’est dans ce cadre que s’inscrit ce mémoire dont le but est de développer une méthode simple permettant d’extraire de l’information spatiale et temporelle fiable de modèles réduits de retenues d’eau.

Pour répondre à cette exigence, une méthode photogrammétrique, nommée méthode de la DLT, a rapidement été détectée dans la littérature. Ce procédé serait apte à reconstruire tridimensionnellement une scène à partir d’un minimum de deux images issues de caméras « grand-public ». Dès lors l’hypothèse de travail suivante a été formulée :

La Transformation Linéaire Directe (DLT) est-elle apte à fournir un Modèle Numérique de Surface (MNS) dynamique d’un modèle réduit de la rupture d’une retenue d’eau et ce, à une précision de l’ordre des éléments constitutifs de celle-ci et avec comme outil d’acquisition, des appareils photographiques « grand public » ?

La première étape de ce mémoire fut d’expliquer les concepts théoriques fondamentaux de la méthode de la DLT. Un premier programme implémenté sous MATLAB, accompagné d’un protocole d’acquisition de données a permis d’appliquer la théorie à un objet test : une maquette en briques « Lego ». L’analyse des résultats a permis de détecter la présence d’erreurs systématiques dues aux distorsions optiques engendrées par l’objectif de l’appareil photographique. Dès lors une modélisation de ces distorsions a été intégrée à la théorie de la DLT. L’implémentation améliorée ainsi que le protocole d’acquisition de données ré appliqués à la maquette « Lego » ont permis d’obtenir une précision de restitution de 0,4 millimètre. La méthode photogrammétrique a donc été jugée suffisamment mûre pour l’appliquer au modèle réduit de retenue d’eau.

La méthode de la DLT et le protocole d’acquisition de données ont été testés sur la retenue d’eau avant et après sa rupture par surverse. La précision de restitution obtenue est de 2 millimètres en utilisant quatre appareils photographiques. En statique, on peut donc affirmer que la méthode de la DLT est apte à fournir une précision de restitution inférieure à la taille des éléments constitutifs de celle-ci (graviers de calibre 7-14 millimètres). Dès lors, en sélectionnant n’importe quel pixel dans une image et ses pixels homologues dans les trois autres, la position tridimensionnelle du point de la scène correspondant à ces pixels est restituée à 2 millimètres

près, ce qui est un excellent résultat. Si la détection des points homologues est généralisée à tous les pixels présents dans au moins 2 clichés, un MNS dynamique « avant-après rupture » pourrait être construit.

Pour une restitution de l’état de la retenue à n’importe quel temps intermédiaire (entre le temps initial et le temps final), il a été mis en évidence que la définition d’un volume de calibration était un élément essentiel pour minimiser l’erreur de restitution. En outre, il a été démontré qu’il était impossible de garantir la précision de restitution à un temps intermédiaire puisqu’aucun point de vérification à ce temps n’est présent à ce temps. Cependant, nous sommes convaincus que la précision est d’un ordre proche de celle obtenue en statique grâce au volume de calibration. L’hypothèse de départ ne peut donc pas être confirmée pour la création d’un MNS dynamique « pendant la rupture ».

Ensuite, certaines recommandations ont été formulées si l’évolution de la rupture de la retenue d’eau voulait être modélisée. Elle impliquerait selon la vitesse de l’évènement à restituer, l’utilisation d’appareils vidéographiques ou d’appareils photographiques déclenchés de manière synchrone. En outre, une solution utilisant des flotteurs a été imaginée pour accéder à la surface du plan d’eau au cours du temps.

Enfin, ce mémoire a permis de créer un protocole efficace d’acquisition de données ainsi que deux modules MATLAB opérationnels :

- *DLT_Calibration_16p*, qui permet la calibration de prises de vue en intégrant la modélisation des distorsions optiques sur base d’un minimum de 8 points de calibration ;
- *DLT_Restitution_16p*, qui permet la restitution tridimensionnelle d’un nombre illimité de points homologues en intégrant un nombre illimité de prises de vue ;

Ces trois éléments peuvent a priori être utilisés pour obtenir un modèle tridimensionnel de n’importe quel objet, à condition d’y intégrer un module de détection des points homologues.

17. PERSPECTIVES

La méthode de la DLT est considérée comme un « moteur » de restitution dont l’efficacité n’est pas à remettre en doute. Cependant, ce moteur doit être alimenté en coordonnées-images des points homologues. La détection des points homologues, dont il a été question dans l’état de l’art devrait absolument être intégrée pour pouvoir effectivement produire des modèles tridimensionnels. Deux solutions sont envisageables :

- utiliser la suite open-source MICMAC (“Micmac, Apero, Pastis”) de détection automatique de points homologues développée par l’IGN français ;
- implémenter une détection automatique de ces points basée sur la méthode SIFT (Lowe, 2004).

Une seconde perspective concernerait la création d’une interface plus « user-friendly » que les scripts MATLAB bruts. Cette application interactive en plus d’être agréable esthétiquement, pourrait automatiser ou aider l’utilisateur dans certaines tâches comme par exemple, la digitalisation des points de calibration.

Une troisième perspective serait la réalisation d’une expérience permettant de quantifier la qualité de la restitution à l’intérieur du volume de calibration. La maquette « Lego » pourrait être utilisée. Voici une description sommaire du protocole :

- distribution de PC sur la maquette (temps initial) ;
- acquisition de clichés à partir d’un minimum de deux appareils dont la position est stable ;
- sans bouger la maquette, enlever un certain nombre de pièces ;
- placer des PV sur la nouvelle surface (temps intermédiaire)
- acquisition des clichés ;
- sans bouger la maquette, enlever une nouvelle fois un certain nombre de pièces ;
- placer des PC sur la surface (temps final) ;
- Acquisition d’image.

Les clichés seraient calibrés sur base du volume défini par les PC du temps initial et du temps final. Une comparaison des coordonnées-mondes mesurées et obtenues via l’algorithme des PV permettrait de quantifier l’erreur de restitution à l’intérieur du volume de calibration. Ce qui n’a pu être effectué lors de l’expérience sur la retenue d’eau.

BIBLIOGRAPHIE

Agisoft PhotoScan. URL <http://www.agisoft.com/>

Apple Computer, Inc, 2005. Aperture - Principes fondamentaux de la photographie numérique.

Association française de topographie. Lexique de la topographie. Lex. Topogr. URL <http://www.aftopo.org/FR/LEXIQUE/Mode-operatoire-7-25?PHPSESSID=b2c79b64e6c754945205a1ad3627d848>

Aziz, A., Karara, H., 1971. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. Présenté à the Proc. of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1–18.

Billen, R., 2014. Cours de topographie, ULg.

Bodeux, S., Masson, J., Vanhaele, D., Willems, T., 2014. Projet Ingénieur: construction d’une retenue d’eau à l’échelle.

Bonelli, S., 2001. Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l’action de l’eau Ingénieries - E A T, p.49 – p.58.

Brown, D., 1972. Calibration of Close Range Photogrammetry. Photo Eng XXXVII, pp.855–866.

Caillau, R., n.d. Fundamental dimensions - Lego. URL <http://www.robertcailliau.eu/Lego/Dimensions/zMeasurements-en.xhtml>

Canon. URL <http://www.canon.com/>

Chen, F., 1997. Application of Least-Squares Adjustment Technique to Geometric Camera Calibration and Photogrammetric Flow Visualization.

Chen, L., Armstrong, C.W., Raftopoulos, D.D., 1994. An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. J. Biomech. 27, 493–500.

CIGB. Le rôle des barrages. Comm. Int. Gd. Barrages. URL http://www.icold-cigb.org/FR/Barrages/role_des_barrages.asp

Cornet, Y., 2014. Cours de photogrammétrie, ULg.

Courivaud, J.-R.. Etat de l’art de la modélisation des ruptures par surverse de digues et barrages en remblai.

Dewals, B., Benoit, M., Kadi Abderrezzak, K. El, 2014. Proposition d’un sujet de thèse : Modélisation physique et numérique des écoulements générés par la formation de brèche dans les digues fluviales soumises aux surverses. URL <http://www.hach.ulg.ac.be/cms/system/files/PROPOSITION.pdf> (accessed 12.1.14).

Ernst, J., 2006. Modélisation tridimensionnelle de fragments urbains par voie photogrammétrique. Université de Liège.

Epicum, S., Dewals, B., Archambeau, P., Pirotton, M., Vuillot, J.M., 2009. Etude numérique et sur modèle physique de l'aménagement de Taoussa (Mali). Présenté à la 195e session du Comité Scientifique et Technique de la SHF - Modèles physiques hydrauliques, SHF.

Eudes, A., 2011. Localisation et cartographie simultanées par ajustement de faisceaux local : propagation d'erreurs et réduction de la dérive à l'aide d'un odomètre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Florou, G., Mohr, R., 1996. What accuracy for 3D measurements with cameras?, in: , Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996. Presented at the , Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996, pp. 354–358 vol.1. doi:10.1109/ICPR.1996.546048

Gabriela, D., 2008. Improving the accuracy of Digital Terrain Models. Stud. Univ. Babeş-Bolyai Infomatica LIII, 65–72.

Guerra, F., Balletti, C., 1998. NM3 digit: the DLT algorithm in a digital photogrammetrical software for the survey teaching, in: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. Presented at the ISPRS WG VI/3 International Cooperation and Technology Transfert, pp. 33–50.

Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector, in: In Proc. of Fourth Alvey Vision Conference. pp. 147–151.

Hatze, H., 1988. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. J. Biomech. 21, 533–538.

Héno, R., 2008. Photogrammétrique numérique.

Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., 2010. Dense point cloud acquisition via stereo matching applied to: the Kilwa archaeological site and the Gallo-Roman theatre of Mandeure.

Kalantari, M., Kasser, M., 2008. Photogrammétrique et vision par ordinateur Revue XYZ, Association Française de Topographie, pp.49–54.

Karara, H.M., Faig, W., 1980. An expose on photographic data acquisition systems in close range photogrammetry. Presented at the 14th Congress of the international society for photogrammetry, Hambourg.

Kodak . URL <http://www.kodak.com/>

Kraus, K., Waldhäusl, P., 1997. Manuel de photogrammétrique : Principes et procédés fondamentaux. Hermes Science Publications, Paris.

Kwon, Y.-H., 1998. The DLT method,. URL <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html> (accessed 11.2.14).

Landes, T., Grussenmeyer, P., Boulaassal, H., 2011. Les principes fondamentaux de la

lasergrammétrie terrestre: acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2). XYZ 25–38.

Laplanche, F., Billen, R., Teller, 2008. Méthode de relevé rapide de scènes urbaines tridimensionnelles dans le cadre d’évaluations environnementales stratégiques. Rev. Int. Géomat. 18, 147–167. doi:10.3166/geo.18.147-167

Lay, D.-C., Citta-Vanthemsche, M., 2004. Algèbre linéaire : Théorie, exercices & applications, 3e édition. ed. De Boeck, Bruxelles.

Lee, C., Faig, W., 1999. Dynamic Monitoring with video systems. Photogramm. Engineering Remoting Sens. 65, pp 589–595.

Leica Geosystems AG, 2009. Leica TPS1200+ Series - Station totale de haute performance.

Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int. J. Comput. Vis. 60, 91–110.

Mathworks - Matlab . URL <http://fr.mathworks.com/products/matlab/>

Micmac, Apero, Pastis. URL <http://logiciels.ign.fr/?Micmac>

Mohamed, M.A.A., 2002. Embankment Breach Formation and Modelling Methods. Open University.

Morris, M.W., Hassan, M., 2007. Breach formation: Field test and laboratory experiments. J. Hydraul. Res. - J HYDRAUL RES 45, 9–17. doi:10.1080/00221686.2007.9521828

Pfeifer, N., 2007. Overview of TLS systems, overall processing and applications, theory and application of Laser Scanning. Presented at the SPRS summer school 2007, Ljubljana, Solvenia.

Photodeler . URL <http://www.photodeler.com/index.html>

Pickert, G., Weitbrecht, V., Bieberstein, A., 2011. Beaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. J. Hydraul. Res. 49 (2).

Rifai, I., Erpicum, S., Archambeau, P., Benoit, M., Pirotton, M., Dewals, B., Kadi Abderrezzak, K. El, 2015. Physical modeling of lateral dike breaching due to overtopping: a review.

Schmocker, L., Hager, W.H., 2009. Modelling dike breaching due to overtopping. J. Hydraul. Res. 47, 585–597. doi:10.3826/jhr.2009.3586

Shapiro, R., 1978. Direct Linear Transformation Method for Three-Dimensional Cinematography. Res. Q. Am. Alliance Health Phys. Educ. Recreat. 49, 197–205. doi:10.1080/10671315.1978.10615524

Sony . URL <http://www.sony.com/>

Spinewine, B., 2004. Experimental investigation of the breach growth process in sand

dikes. River Flow pp.983–991.

Zeroual, I., Liazid, A., 2006. Expérimentation de la transformation linéaire directe pour différentes applications en photogrammétrie. XYZ 35–40.

ANNEXES NUMERIQUES

L’annexe numérique comprend :

- Les deux modules MATAB : *DLT_Calibration_16p* et *DLT_Restitution_16p* ;
- Les photographies, les coordonnées-images des PC et PV, les coordonnées-mondes des PC et PV concernant l’expérience sur la maquette LEGO ;
- Les photographies, les coordonnées-images des PC et PV, les coordonnées-mondes des PC et PV concernant l’expérience sur la maquette de retenue d’eau (TEMPS INITIAL) ;
- Les photographies, les coordonnées-images des PC et PV, les coordonnées-mondes des PC et PV concernant l’expérience sur la maquette de retenue d’eau ; (TEMPS FINAL)
- les coordonnées-images des PC et PV, les coordonnées-mondes des PC et PV concernant l’expérience sur la maquette de retenue d’eau ; (TEMPS INITIAL + TEMPS FINAL)