

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg

**Modélisation numérique
du glissement de terrain de Super Sauze
par voie de photogrammétrie aérienne**

Rapport de Stage

*Deuxième Année de Formation Ingénieur
Spécialité Topographie*

UFR de Géographie - CEREG
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Jean Baptiste HENRY

Décembre 1999

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet :

M. Olivier MAQUAIRE, maître de conférences à l'Université Louis Pasteur, pour m'avoir fait confiance durant toute la période du stage ainsi que pour avoir mis à ma disposition la documentation, les moyens financiers et matériels nécessaires à la réalisation de ce projet.

M. Pierre GRUSSENMEYER, maître de conférences à l'ENSAIS, pour m'avoir permis de disposer du matériel du laboratoire, et plus particulièrement des chambres de prise de vues, des outils informatiques et logiciels, pour m'avoir guidé et aidé dans la préparation de la mission, et au cours des différentes étapes de traitement.

M. Samuel GUILLEMIN, technicien cartographe du Laboratoire de Photogrammétrie, pour m'avoir formé au logiciel PHOTOMOD, mais aussi pour ses conseils.

M. Jean Philippe MALET, doctorant à l'UFR de Géographie, pour son action et son énergie irremplaçables pendant les opérations de terrain, pour son soutien pendant les traitements et l'intérêt qu'il y a porté.

M. Patrick CAPRON, ingénieur ENSAIS (G99), pour son aide inestimable lors des calculs d'aérotriangulation, son soutien quotidien.

Le support technique de Continental Hightech Service (CHS-CARTO France), distribuant le logiciel PHOTOMOD, pour leur disponibilité et leur patience.

Un grand merci également à Anne, Claire, Myriam et Emmanuel pour leurs contributions aux travaux de terrain

Sommaire

<i>Remerciements</i>	2
<i>Sommaire</i>	3
<i>Introduction</i>	5
<i>Présentation géographique et géomorphologique du site</i>	6
1. Notions géomorphologiques	6
1.1. Le bassin versant	6
1.2. Le glissement de terrain	7
2. Le site de Super Sauze	8
2.1. Localisation géographique et climatique	8
2.2. Présentation du projet	9
<i>Description et préparation des opérations de relevé</i>	<i>12</i>
3. Photogrammétrie aérienne	12
3.1. Généralités	12
3.2. Photogrammétrie numérique	14
3.3. La triangulation photogrammétrique ou aérotriangulation	18
3.4. Principes de compensation	20
4. Préparation de la mission	23
4.1. Reconnaissance du terrain	23
4.2. Définition des paramètres de vol	23
4.3. Choix de la chambre de prise de vues	23
4.4. Calibration de la chambre de prise de vues	26
4.5. Préparation du vol photographique	28
5. Opérations de terrain	29
5.1. Points de calage	29
5.2. Le vol photographique	29
<i>Traitements et analyse</i>	<i>31</i>
6. Exploitation	31
6.1. Observations topométriques	31
6.2. Couverture photographique	32
7. Le logiciel PHOTOMOD	34
7.1. Descriptif sommaire	34
7.2. Protocole opératoire	34
7.3. Orientation interne	35
7.4. Orientation relative	36
7.5. Aérotriangulation	37
7.6. Programmation de modules complémentaires	38
7.7. Orientation absolue	39
7.8. Génération du modèle numérique	40
7.9. Création d'une orthophotographie	41
8. Présentation et analyse des résultats	42
8.1. Orientations internes	42
8.2. Orientations relatives	42

8.3. Aérotriangulation	42
8.4. Orientations absolues	43
8.5. Modèles numériques de terrain	45
<i>Perspectives et conclusions</i>	46
9. Perspectives	46
9.1. Concernant les opérations de terrain	46
9.2. Concernant les travaux photogrammétriques	47
10. Conclusions	48
10.1. Conclusion sur le travail effectué	48
10.2. Conclusion générale	48
<i>Références bibliographiques</i>	49
<i>Table des illustrations</i>	51

Contenu des annexes

Annexe 1 :

- Saisie et calcul d'aérotriangulation sous PHOTOMOD

Annexe 2 :

- Détails des calculs en photogrammétrie générale et aérienne
- Extrait de la carte 1/25000, IGN n° , série bleue
- Résultats de calibration
- Composition des bandes et du bloc
- Code source des modules complémentaires

Annexe 3 :

- CD #1 : photographies du site noir et blanc, format .BMP
- CD #2 : fichiers (topographie, restitution...), MNT, programmes

Introduction

C'est dans le cadre de la thèse de Jean Philippe Malet, doctorant à l'UFR de Géographie de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, et sous la direction d'Olivier Maquaire, maître de conférence, que m'a été confiée la réalisation d'un modèle numérique de terrain du bassin versant du glissement de terrain de Super Sauze, dans la région de Barcelonnette.

Cette région des Alpes de Haute Provence est sujette depuis plusieurs années à des effondrements de pans entiers de montagne. Le Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG) suit depuis quelques temps l'évolution de ces zones par voie GPS, en collaboration avec l'équipe de Géosciences Azur dirigée par Eric Calais, dans le cadre des activités du groupe de recherche sur les risques naturels.

Afin de réaliser cette modélisation, le choix s'est porté sur la photogrammétrie aérienne. Cette méthode de relevé permet en effet de couvrir rapidement des zones de grande étendue, tout en minimisant le temps passé sur le terrain. Je développerais donc les grandes lignes et les principes généraux des méthodes employées pendant les opérations de terrain, puis l'étape des calculs de la couverture photographique pour terminer par la réalisation du modèle numérique de terrain.

Le Centre d'Etudes et de Recherche Eco-Géographiques regroupe des enseignants, chercheurs et techniciens de différents laboratoires de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg et de l'Institut National de Recherche Agronomique. Cette entité a une vocation pluridisciplinaire et est rattachée au CNRS par les sections :

- **Planète Terre : enveloppes superficielles** : département Sciences de l'Univers
- **Diversité biologique, population, écosystèmes, évolution** : département Sciences de la Vie
- **Hommes et milieux : évolution, interaction** : département Sciences de l'Homme et de la Société

Les thèmes de recherche abordés gravitent autour d'un axe d'étude centré sur le système « eau-sol-plante ». Les équipes de recherche travaillent sur cinq thèmes bien précis :

- Bassins versants de moyenne montagne : étude et modélisation de leur structure et de leur fonctionnement à différentes échelles.
- Lits fluviaux et vallées alluviales
- Environnement, cartographie, télédétection
- Structure, fonctionnement et aménagement des milieux tropicaux
- Risques naturels : climatiques, géomorphologiques et hydrologiques

Pour mener ses travaux, le CEREG dispose de personnels de compétences diverses : ingénieurs, techniciens et administratifs du CNRS et du Ministère de l'Education Nationale. Il dispose également de moyens matériels importants qui sont soit des équipements permanents, comme les stations hydro-météorologiques, soit des équipements utilisés lors de campagne de mesures intensives.

Pour terminer cette introduction, il convient de préciser que le but de ce projet s'inscrit dans un protocole de recherche et que les travaux présentés s'inscrivent dans cette logique. Par conséquent, ce rapport se veut de bien replacer les possibilités, les exigences et les limitations de la photogrammétrie aérienne dans le cadre d'études géomorphologiques et hydrologiques.

Présentation géographique et géomorphologique du site

1. Notions géomorphologiques

Les premiers effondrements de la région de Barcelonnette ont eu lieu dans les années soixante. Afin de mieux comprendre les différents phénomènes en jeu et les suivis qu'ils impliquent, il est utile de définir un certain nombre de notions géomorphologiques fondamentales concernant les glissements de terrain et leur environnement.

1.1. Le bassin versant

1.1.1. Définition

On définit un bassin versant en un point précis d'un cours d'eau, qu'on appelle exutoire du bassin. Selon l'échelle de travail, on choisit le plus souvent une singularité comme une sortie d'agglomération, l'aval d'une confluence... Plus concrètement, le bassin versant apparaît comme étant une entité territoriale qui concentre les précipitations en un point, suite aux processus d'infiltration et de ruissellement de surface.

On différencie bassins versants topographiques et hydrogéologique. Le premier est délimité par les lignes de crêtes entourant la zone en amont de l'exutoire, alors que le second s'attache plus aux notions d'infiltration et d'infiltrabilité de l'eau, et prend donc en compte la structure géologique des sols.

1.1.2. Evolution des méthodes d'étude

La première rationalisation du cycle de l'eau émerge à la Renaissance avec Bernard Palissy, mais il faudra attendre la fin du 18^{ème} siècle pour voir s'établir la relation entre pluies et génération des débits.

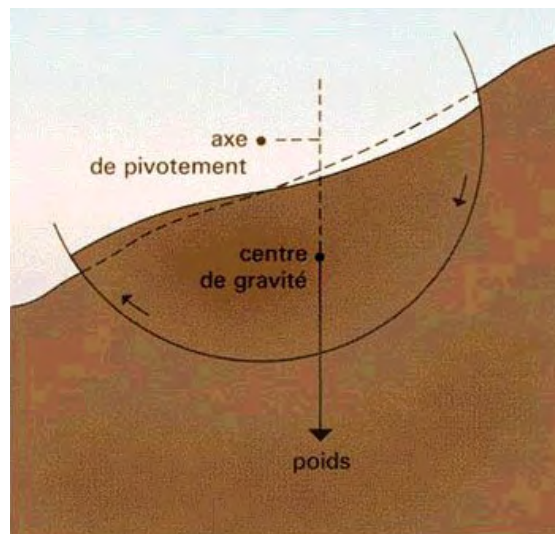
Le 20^{ème} siècle est ensuite le siège de la naissance des premières modélisations, formules et méthodes. Quand bien même la notion de bassin versant serait stable de puis le siècle dernier, on assiste à une évolution constante de la modélisation des phénomènes hydrologiques, bien évidemment couplée à l'essor des techniques disponibles.

1.2. Le glissement de terrain

1.2.1. Origines

Dans la plupart des cas, les glissements de terrain trouvent leurs origines dans des changements de topographie, dus soit à l'érosion rapide du pied de certaines pentes, soit à l'exécution de fouilles inconsidérées. Le site de Barcelonnette se situe plutôt dans le premier cas.

Le processus progressif d'altération qui consiste à réduire la résistance mécanique des roches peut avoir plusieurs origines. La plus flagrante, et celle qui est la plus souvent responsable de ces phénomènes, est la variation du régime des eaux souterraines. En effet, on peut constater d'une part la diminution des contraintes effectives, résultante de l'augmentation de la pression de l'eau imprégnant le terrain. D'autre part, à ceci s'ajoute la force d'entraînement de l'eau qui circule sur le terrain. Suite à des pluies, ces deux composantes peuvent présenter des variations rapides et importantes.



(fig. 1.1) Mécanique d'un glissement

Ces éléments apparaissent donc comme les éléments déclenchants du mouvement (fig. 1.1), résultants d'une altération progressive, qui peut être restée inapparente.

1.2.2. Les mécanismes d'écoulement

Fréquemment, on observe que les matériaux constituant le glissement se superposent : l'allochtone se déverse par dessus le terrain naturel, l'autochtone. On est alors en présence d'une coulée boueuse, constituée d'un matériel totalement désorganisé qui avance lentement.

Une coulée de ce type peut emporter des éléments de son substratum et de ses rives, par érosion, mais également occuper des vallées formées de roches dures, qui vont alors canaliser ce flux. Le véritable danger pour les populations se trouve alors ici, puisqu'elles peuvent alors atteindre des zones parfaitement stables, déjà habitées.

2. Le site de Super Sauze

2.1. Localisation géographique et climatique

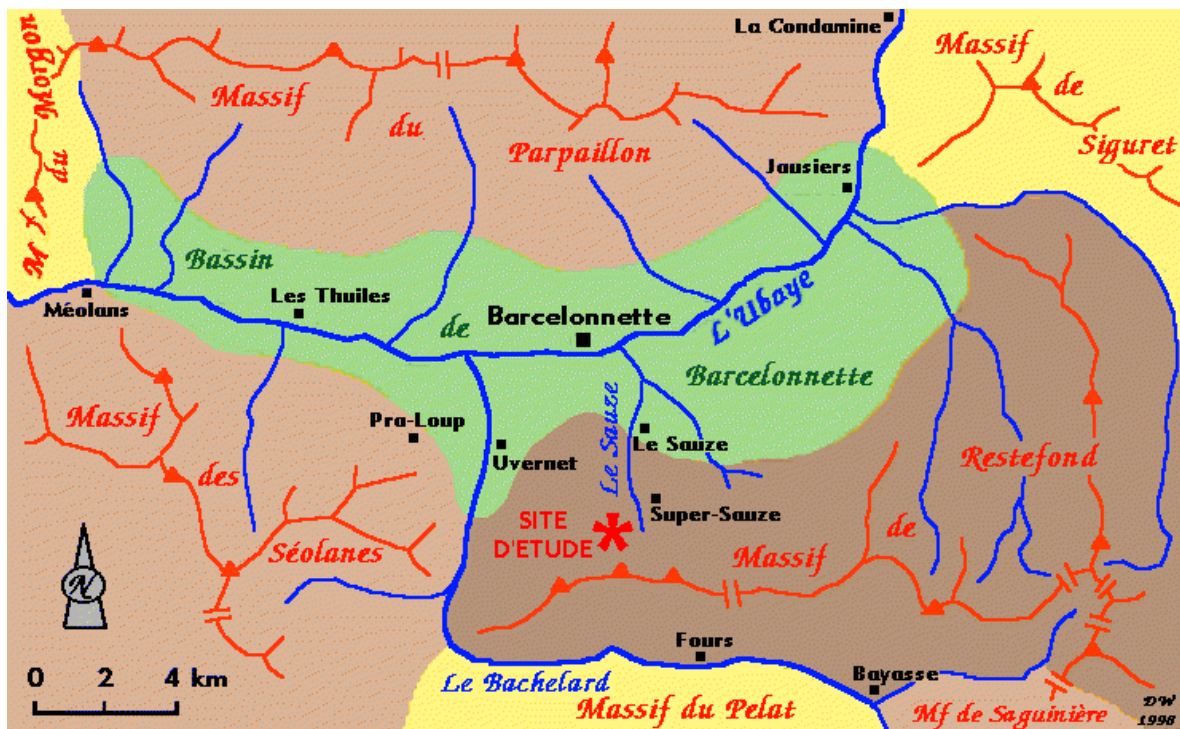
2.1.1. Position géographique

La commune de Barcelonnette se situe dans la vallée de l'Ubaye, dans les Alpes de Haute Provence (fig. 2.1).



(fig. 2.1) Les Alpes de Haute Provence

Le glissement étudié est quant à lui au sud de l'agglomération, dans le massif de Restefond (fig. 2.2 et extrait de carte IGN 1/25000 en annexe).



(fig. 2.2) Localisation géographique du site (image SERTIT)

Cette région des Alpes est constituée de nappes de charriage, et l'érosion a fait de cette zone une fenêtre tectonique. Elle est donc d'un intérêt capital, puisque l'on peut voir les terrains autochtones, et par conséquent acquérir des données géophysiques de visu.

La forte présence des marnes noires a pour effet, de par leur fragilité structurelle, de favoriser les écoulements rapides et donc, la formation de ravines. De plus, l'exploitation des versants boisés par l'homme a eu pour conséquence directe d'exposer la vallée aux aléas météorologiques et géomorphologiques.

2.1.2. Environnement climatique et hydrologique

De par sa situation géographique, le bassin de Barcelonnette bénéficie d'un climat méditerranéen, cependant quelque peu atténué par l'altitude et une légère influence continentale. D'autre part, on peut constater une grande variabilité spatiale des températures et des précipitations, selon les versants et selon l'altitude.

2.1.3. Des prédispositions géologiques

Le site est un bassin torrentiel, formé de marnes noires très peu calcaires, qui s'est raviné en bad-lands. De plus, on constate la décompression des versants due à la fonte des glaciers, et que ces versants raides sont dépourvus de végétation. L'existence d'une dénivelée assez importante, jusqu'à 150 m, entre le replat et le centre du bassin torrentiel, ainsi que la présence d'un bassin d'alimentation sont également des facteurs morphologiques à prendre en compte.

Les conditions géomorphologiques ainsi réunies sont favorables au développement de mouvements (Malet et Genet, 1997).

2.2. Présentation du projet

Le projet dans lequel s'est inscrit mon travail a été présenté à l'Institut National des Sciences de l'Univers sous le titre :

‘ Développement de modèles de traitement en géophysique adaptés aux glissements - coulées des marnes callovo-oxfordiennes du bassin de Barcelonnette. Modélisation de leur comportement. ’

2.2.1. Explicitation du projet

Les glissements de marnes noires sont complexes et associent un effondrement en amont, suivi d'une coulée de débris en aval. Le couloir emprunté par cette coulée, appelée paléo-topographie, qui va fortement influencer sur sa direction, sa teneur en eau et donc, indirectement, sur sa vitesse de déplacement. D'autre part, les torrents latéraux et les ravines sont susceptibles de provoquer des coulées de boues ou des laves torrentielles.

Afin d'étudier et de prévoir les évolutions du glissement il est donc utile de mettre en place des modèles de comportement des matériaux, de déterminer les volumes pouvant être mis en mouvement et d'en simuler les conditions climatiques.

Les objectifs d'étude sont donc principalement de l'ordre de la modélisation. En effet, il s'agit de mettre en évidence les circulations d'eau dans sa masse pour comprendre la dynamique de l'écoulement et l'évolution du glissement-coulée, d'aider au choix de modèle de comportement de ce type de formation en roches argilo-marneuses grâce à des investigations in situ. Enfin, il s'agit de développer les modèles de traitement géophysique adaptés aux glissements de terrain pour définir la géométrie et la structure interne de la coulée, en fonction de la distance à la couronne.

2.2.2. *Intérêts et problématique*

Ce type de glissements est très courant dans le monde. Il est donc possible de généraliser les résultats obtenus à Super Sauze, et dans le bassin de Barcelonnette, aux autres cas.

Plus généralement, ces glissements possèdent une morphologie caractéristique, à savoir un détachement rétrogressif de matériau de la couronne, qui s'accumule dans un ou plusieurs ravins à bords raides. Il est par conséquent difficile de délimiter exactement l'aval de la coulée et de connaître la profondeur des ravines d'écoulement. L'intérêt du site est finalement qu'il est resté à son état naturel.

Les différentes questions que soulève le site sont alors essentiellement de l'ordre de la modélisation. Celle-ci devrait permettre l'établissement de résultats capitaux concernant l'évolution de glissements potentiellement dangereux, puisqu'il n'a fait l'objet d'aucun aménagement hydraulique ni d'opérations de revégétalisation.

2.2.3. *Objectifs du programme*

Ce programme de recherche a pour but de développer une méthodologie de mesure et des modèles de traitement en géophysique adaptés aux glissements de terrain complexes en les associant aux méthodes de physique des roches et de géotechnique.

Concrètement, il s'agit de définir précisément la géométrie du glissement, l'épaisseur des couches, le paléorelief en se basant sur les caractéristiques physiques et mécaniques des roches et des sols, de trouver la relation permettant de passer de la cartographie des résistivités à celle des teneurs en eau. De plus, la mise en évidence des circulations d'eau au sein de la masse devrait permettre de comprendre la dynamique de la coulée.

Finalement, l'acquisition de données in situ reste encore une étape incontournable soit par l'exécution de campagnes intensives, soit par la mise en place de dispositifs permanents.

2.2.4. *Objectifs de la modélisation*

La modélisation hydrologique a pour but essentiel de déterminer des débits à l'exutoire. Par conséquent, il est indispensable de pouvoir connaître les paramètres physiques caractérisant un bassin versant. Les deux notions présentées plus haut (cf. §1.1.1) vont intervenir dans cette détermination, et la représentation de sa surface en sera une étape primordiale, par l'intermédiaire du modèle numérique de terrain.

Cette modélisation combinée aux états de surfaces, à la géologie du site permettront de définir des axes d'évolution envisageables du glissement. L'emploi ultime de ces données s'inscrit donc dans la partie simulation des comportements du projet de recherche.

Afin de pouvoir prétendre à des résultats les plus vraisemblables possibles, en terme de surface de réception des précipitations, de temps de concentration et donc de débits, il a semblé nécessaire d'imposer une précision de 650 cm au modèle numérique de terrain.

Description et préparation des opérations de relevé

3. Photogrammétrie aérienne

Dans les paragraphes qui suivent ne sont exposés que les grandes généralités et les principes fondamentaux de la photogrammétrie. Une information plus détaillée sur les étapes de calcul de la photogrammétrie aérienne et numérique est présentée en annexe 2

3.1. Généralités

3.1.1. Historique

La photogrammétrie peut se définir comme étant la science, l'ensemble des méthodes et techniques permettant de définir la forme et la position d'objets à partir de photographies de ceux-ci.

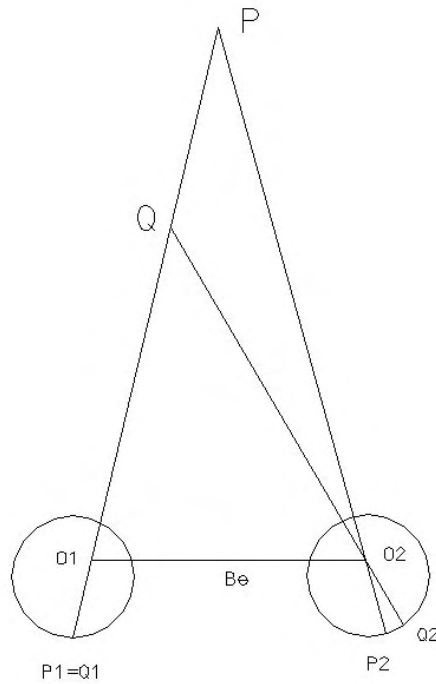
C'est en 1859 que le colonel français A. Laussedat présenta à l'Académie des Sciences, une méthode de détermination de coordonnées de points basée sur un calcul d'intersection spatiale à partir d'un couple de clichés de l'objet. Parallèlement, l'architecte allemand A. Meydenbauer, à qui l'on doit le terme de photogrammétrie, utilise avec succès ces techniques dans des travaux architecturaux de grande envergure. De nombreux progrès techniques et théoriques ont permis, dès le début du 20^{ème} siècle, à cette science nouvelle d'évoluer rapidement : la stéréophotogrammétrie développée par C. Pulfrich (1901), la définition de principes pour une mise en œuvre rationnelle des restituteurs optico-mécaniques par O. von Gruber...

Actuellement, le développement des moyens de calculs est tel, qu'ils permettent de traiter toujours plus de données, avec des algorithmes toujours plus complets.

3.1.2. Les grands principes de la photogrammétrie

La photogrammétrie exploite la faculté de l'homme à percevoir le relief à partir de deux images planes d'un objet, prises de deux points de vue différents. C'est ce que nous faisons quotidiennement grâce à nos yeux et leurs rétines.

Comme le montre la figure (fig. 3.1), les points P et Q de l'espace objet sont à des éloignements différents du point d'observation. Il en résulte une parallaxe horizontale (P_2Q_2), qui différencie les deux images rétinienne lors du fusionnement. Il est intéressant de noter que l'acuité en vision binoculaire est de l'ordre de 5'' à 10'', soit 16 à 48 μ m pour une distance de mise au point de 1m, alors qu'elle n'est que de 30'' en vision monoculaire, soit 160 μ m pour la même distance de mise au point.



(fig. 3.1) Principe de la vision binoculaire, plan d'observation horizontal (Kraus, 1998)

A partir de deux clichés, on peut reconstituer le même processus. La détermination de l'objet est alors basée sur la mesure des coordonnées, dans l'espace image, de la trace que cet objet a laissée sur l'émulsion photographique. L'élément fondamental de la mesure stéréoscopique est, dans le cas normal, la parallaxe horizontale (fig. 3.2), à partir de laquelle peut être calculé la distance à l'objet (voir §3.1.3).

Au final, les coordonnées tridimensionnelles de l'objet, dans un système de référence qui lui est propre, sont issues d'une transformation spatiale, dite projective ou de similitude.

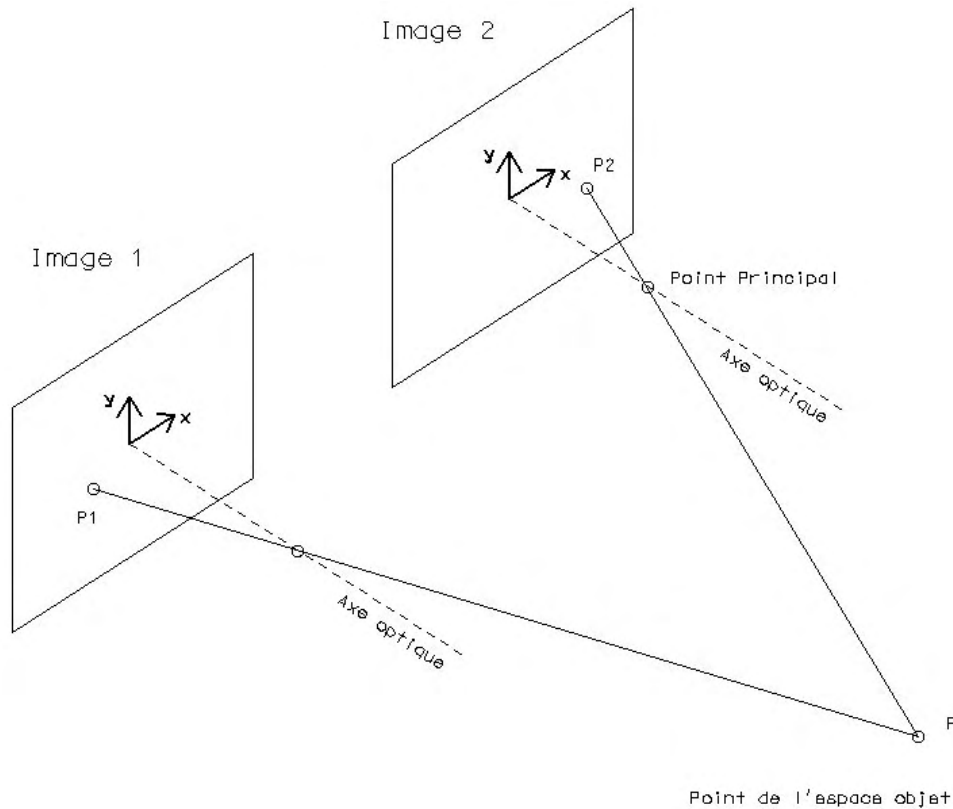
3.1.3. La mesure photogrammétrique

Cette opération porte le nom de stéréorestitution, et nécessite des calculs préalables, le premier étant l'orientation interne. Cette étape permet de définir le référentiel des mesures effectuées sur un cliché. Elle est réalisée grâce aux repères de fond de chambre (fig. 4.2), lorsqu'ils existent.

Enfin, l'orientation externe permet de se rapporter à l'objet. Cette orientation peut être faite en une étape, en établissant un lien direct entre les mesures sur le cliché et le système de référence de l'objet ou en deux étapes, soit une orientation relative, qui crée un modèle plastique permettant l'observation stéréoscopique, puis une orientation absolue qui projette ce stéréomodèle sur le système objet, par le biais d'une similitude spatiale [1].

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + mR \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad [1]$$

Plus concrètement, la mesure photogrammétrique consiste, après élimination de la parallaxe verticale, à déterminer la parallaxe horizontale, dans les référentiels image de chacun des clichés. La parallaxe verticale est éliminée lors de l'orientation relative du couple. On satisfait alors la condition de coplanéité, fondamentale pour autoriser toute mesure ultérieure.



(fig. 3.2) Parallaxe horizontale sur un couple de clichés

Dans un cadre général, on pourra alors déterminer les coordonnées modèle de tout point, pour ensuite les projeter dans le système terrain ou objet. Les relations [2] permettent le passage des coordonnées image aux coordonnées terrain, dans le cas normal, c'est à dire seulement lorsque les axes de prises de vue sont parallèles.

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{c \cdot B}{\xi_2 - \xi_1} \\
 Y &= -Z \frac{\eta_1}{c} \\
 X &= -Z \frac{\xi_1}{c}
 \end{aligned}
 \quad [2]$$

dans ces relations apparaissent B la base, ou distance entre les deux prises de vue, et c, la distance principale de la chambre photographique employée.

3.2. Photogrammétrie numérique

L'évolution actuelle des moyens de calcul informatique est telle que l'emploi de la photogrammétrie numérique est devenue très abordable, par le biais de nombreux logiciels de traitement fonctionnant sur PC et plates-formes classiques.

Le logiciel employé pour ce projet utilise les différentes notions d'imagerie et de photogrammétrie numérique, qui méritent donc d'être explicitées puisqu'elles font partie intégrante du protocole opératoire établi.

3.2.1. Définition de l'image numérique

Une image numérique est une matrice bidimensionnelle de valeurs numériques, de niveaux de gris, correspondant aux valeurs radiométriques issues de l'objet. Chaque élément de l'image, ou pixel (*picture element*) porte donc une information, étalée sur une palette allant de 0 à 255 pour les images codées sur 8 bits, ce qui est le cas le plus courant.

Dans le cas de photographies numérisées, il est alors important de connaître la résolution de scannage, car elle sera nécessairement moins bonne que la résolution initiale du cliché, tant au sens spatial que radiométrique du terme. Une telle constatation impose de considérer certaines limitations dans l'emploi des images numériques dans le cadre de traitements photogrammétriques poussés.

A cette image numérique, on associe un référentiel dont l'axe x est orienté vers la droite et l'axe y vers le bas, centré sur un point décalé d'un demi pixel en x et y du coin supérieur gauche de la matrice. On référence alors les coordonnées des centres de chaque pixel.

Dès lors, un grand nombre de traitements sont possibles pour améliorer les qualités d'image, automatiser les processus de mesures ou les extractions des données.

3.2.2. Images épipolaires ou normales

Les images normales sont capitales pour rendre possible l'application des méthodes de mise en relation automatique des pixels. Ainsi, la vision par ordinateur s'apparente à la vision humaine, puisqu'elle va en reproduire le processus.

Le calcul d'images normales, à partir de prises de vues quelconques, suppose une orientation relative par rotation des clichés préalable. Le calcul consiste alors à déterminer la nouvelle matrice image de l'image normale, en veillant à le paramétrer de telle sorte que toute perte de pixels soit proscrite. Les relations entre pixels de chaque image et les méthodes de rééchantillonnage, présentées plus bas, permettent une réattribution des valeurs radiométriques dans l'image normale.

3.2.3. Corrélation d'image

Le traitement numérique des données photographiques pour la photogrammétrie permet d'utiliser des algorithmes de recherche automatique de points homologues par corrélation sur les clichés d'un couple, basées sur les techniques d'analyse d'image et de traitement du signal.

Mathématiquement, on peut considérer que la valeur de gris d'un pixel, d'une image numérique, est exprimable sous la forme d'une fonction de deux variables, à valeurs discrètes. Dans un couple, chaque image aura alors une fonction de ce type, et la corrélation entre les deux s'exprimera sous la forme d'une somme finie [3].

$$f(x, y) \circ g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m, n) g(x+m, y+n) \quad [3]$$

où f^* est le complexe conjugué de f . L'étude des variations de cette fonction permet de déterminer le maximum de corrélation, avec une taille (M, N) fixée de matrice de pixels, pour une position (x, y) dans l'image (Gonzalez et Woods, 1993).

De façon plus générale et pragmatique, la quasi-totalité de ce type d'algorithmes travaillent avec une matrice de pixels, de taille variable, centrée sur un pixel. Les éléments de la matrice sont les valeurs de niveaux de gris des pixels avoisinant le pointé.

L'algorithme utilisé par PHOTOMOD, logiciel employé pour la réalisation du projet, utilise une matrice, ou fenêtre, de corrélation, dont la taille est fixée par l'utilisateur. Pour trouver l'homologue d'un point saisi sur l'image de gauche, le logiciel applique un filtre de moyenne afin de réduire le bruit. La fenêtre est alors déplacée jusqu'à obtenir un maximum de corrélation. A partir de la position déterminée, le logiciel recalcule le point à une précision sub-pixellaire.

En conclusion, un point homologue n'est validé que si le coefficient de corrélation [4] est supérieur au seuil minimum fixé.

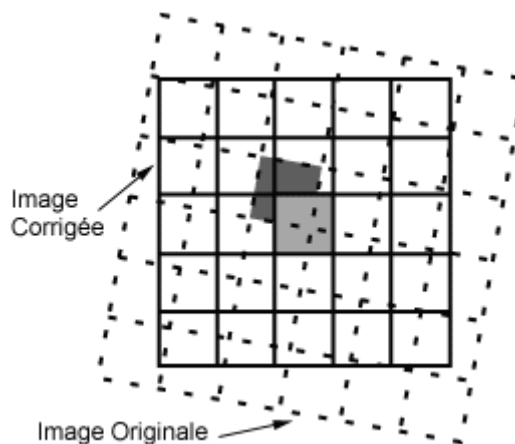
$$c = \frac{\sum (I_g - I_g^{moy})(I_d - I_d^{moy})}{\sqrt{\sum (I_g - I_g^{moy})^2 \sum (I_d - I_d^{moy})^2}} \quad [4]$$

où les I sont les valeurs de niveau de gris des pixels, I^{moy} est une moyenne des valeurs de niveaux de gris à l'intérieur de la matrice de corrélation. Le coefficient ainsi défini est situé dans l'intervalle $[-1,1]$.

3.2.4. Images numériques rééchantillonnées

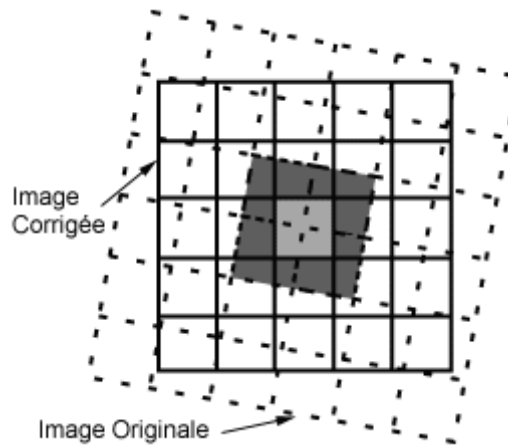
Pour effectuer une correction géométrique de l'image originale, on applique un procédé appelé rééchantillonnage afin de déterminer la valeur numérique à placer dans la nouvelle localisation du pixel de l'image de sortie corrigée. Le processus de rééchantillonnage calcule la nouvelle valeur du pixel à partir de sa valeur originale dans l'image non corrigée. Il existe trois principales méthodes de rééchantillonnage : le plus proche voisin, l'interpolation bilinéaire et la convolution cubique.

La méthode du plus proche voisin (fig. 3.3) utilise la valeur numérique du pixel de l'image originale qui se trouve le plus près de la localisation du nouveau pixel dans l'image corrigée. C'est la méthode la plus simple et elle n'altère pas la valeur originale, mais elle peut produire une duplication des pixels ou une perte de certaines valeurs. Cette méthode a aussi tendance à produire des images bruitées.



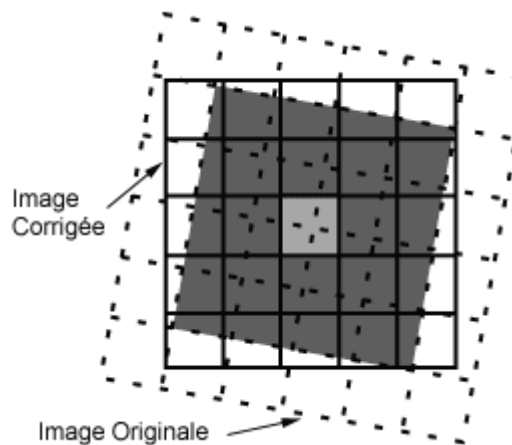
(fig. 3.3) Méthode du plus proche voisin (CCRS)

L'interpolation bilinéaire (fig. 3.4) prend une moyenne pondérée par la distance des quatre pixels de l'image originale les plus près du nouveau pixel. Le procédé de moyenne altère la valeur originale des pixels et crée une valeur complètement nouvelle sur l'image finale.



(fig. 3.4) Interpolation bilinéaire (CCRS)

Le processus de convolution cubique (fig. 3.5) va encore plus loin et calcule la moyenne pondérée par la distance sur un bloc de seize pixels à partir de l'image originale entourant la localisation du nouveau pixel de sortie. Comme pour l'interpolation bilinéaire, cette méthode résulte en de nouvelles valeurs de pixels. Cependant, ces deux méthodes produisent des images à l'apparence plus douce, contrairement à la méthode du plus proche voisin (CCRS, 1998).



(fig. 3.5) Convolution cubique (CCRS)

3.2.5. Orthophotographies et orthophotoplans

Actuellement, on constate un effort de développement considérable des orthophotos et des orthophotoplans. La richesse d'information qu'ils présentent, comparé à une cartographie vectorielle, est en fait leur atout principal (Revue Géomètre, 1999).

Les différentes méthodes de réalisation n'emploient qu'un seul cliché de l'objet. Or, sachant qu'il est impossible de restituer la forme d'un objet sans un couple, il est nécessaire de disposer d'une information supplémentaire telle qu'un modèle numérique de terrain.

L'obtention d'une orthophotographie se fait à partir des clichés originaux, corrigés du point de vue géométrique. En appliquant des surcharges graphiques, des données vecteur on obtient l'orthophotoplan.

Concernant la qualité de ce type de travaux, il est nécessaire de disposer de clichés de qualité photographique élevée. Toute imprécision se ressent inévitablement sur la qualité du produit final.

Pratiquement, la création d'une orthophoto numérique consiste à créer une matrice image dans le plan horizontal des coordonnées terrain, à partir de la matrice image définie dans le système de la caméra. Ceci revient en fait à déterminer une nouvelle image plaquée sur un MNT grâce à des points de contrôles, connus dans les deux surfaces.

3.3. La triangulation photogrammétrique ou aérotriangulation

3.3.1. Définition de l'aérotriangulation

Les principes de base de la stéréorestitution font apparaître que pour travailler sur un stéréomodèle, il faut disposer d'au moins trois points de calage, déterminés par des méthodes géodésiques (tachéométrie, GPS...)

L'aérotriangulation est une extension des méthodes de stéréorestitution, qui permet de restituer de façon globale un bloc de clichés tout en minimisant le nombre de points de calage à déterminer sur le terrain. On peut donc survoler des zones possédant une faible densité de points géodésiques.

3.3.2. Exigences de l'aérotriangulation

Les résultats finaux peuvent alors provenir de deux méthodes de calcul différentes. On dispose tout d'abord d'une méthode de compensation en bloc par modèles indépendants. Celle-ci se base sur une transformation de similitude spatiale appliquée à des coordonnées modèle.

Usuellement, cette méthode est employée avec des prises de vues réalisées avec des chambres métriques, et nécessite la détermination des stéréomodèles, afin d'en obtenir les coordonnées de points qui seront transformées dans le système de référence de l'objet. On doit donc effectuer l'orientation relative des clichés avant de s'intéresser à la transformation qui ramènera dans ce système.

Dans ce cas, la disposition des points de calage va avoir une importance considérable quant aux précisions tant planimétrique qu'altimétrique. Il est également à noter que ces deux paramètres n'ont pas d'influence réciproque dans un tel calcul.

La seconde méthode qui peut être employée est celle dite de compensation par les faisceaux. Celle-ci est développée ci-dessous.

D'après les recommandations de la Société Américaine de Photogrammétrie, il faut veiller à répartir les points de calage de façon suffisamment homogène, en vue d'atteindre une bonne précision, sachant que la solution la plus satisfaisante sera de les disposer dans les coins et sur les bords des bandes constituant le modèle. Le but essentiel est finalement d'éviter toute extrapolation.

De plus, il est recommandé de disposer de 4 à 5 points de calage sur le premier modèle afin de pouvoir effectuer le calcul de l'échelle et de l'orientation absolue avec une précision aussi élevée que possible (ASPRS, 1980). C'est en quelque sorte une condition sine qua non pour démarrer le calcul de l'aérotriangulation.

3.3.3. Préparation d'un vol photographique

Le plan de vol se détermine à partir des différents paramètres de vol, qui doivent être fixés à priori, et des caractéristiques de la chambre de prise de vues employée.

Les différentes relations employées pour la détermination des paramètres de vol sont les suivantes (Kraus, 1998) :

Longueur de côté sur le terrain	$S = s.m_b$
Hauteur de vol au-dessus du sol	$h = c.m_b$
Recouvrement longitudinal	$l = \left(1 - \frac{B}{S}\right) 100$
Recouvrement latéral	$q = \left(1 - \frac{A}{S}\right) 100$
Longueur de base pour l fixé	$B = S \left(1 - \frac{l}{100}\right)$
Distance entre bandes pour q fixé	$A = S \left(1 - \frac{q}{100}\right)$
Intervalles de temps entre prises de vues	$\Delta t_{[s]} = \frac{B_{[m]}}{v_{[m.s^{-1}]}} \geq 2s$

Ces relations sont exprimées dans le cas habituel de la photographie aérienne, c'est à dire avec l'emploi d'un format d'image carré (23x23 cm² généralement) et des axes de prise de vues verticaux.

3.3.4. Effet de filé

La préparation du vol suppose également de porter intérêt aux conditions d'utilisation de la chambre de prise de vues. En effet, pour effectuer les prises, on va employer une vitesse d'obturation pour une ouverture de diaphragme donnée. Cependant, il faut tenir compte du fait que l'avion se déplace, et que ce déplacement aura pour conséquence un filé sur le cliché, détériorant sa qualité.

Concrètement, l'effet de filé a la conséquence suivante : un point de l'objet ne donnera pas un point sur l'émulsion mais une traînée dont la longueur est fonction de la vitesse de déplacement et du rapport d'échelle [5], c'est à dire de la distance à l'objet et de la focale de l'objectif.

$$u_{th} = \frac{v.t}{m_b} \quad [5]$$

où v est la vitesse de l'avion, t le temps d'exposition et m_b le coefficient d'échelle. On obtient alors le filé théorique u_{th}, et on a empiriquement constaté qu'en fait, le filé effectif s'élève à 50% de cette valeur (Kraus, 1998).

Compte tenu de la vitesse de croisière de l'appareil, il convient de choisir un temps d'exposition de l'émulsion suffisamment court afin de limiter les effets de ce désagrément, en veillant à adapter l'ouverture du diaphragme.

3.4. Principes de compensation

3.4.1. Méthode de compensation par les faisceaux

De façon synthétique, cette méthode repose sur l'utilisation des coordonnées images comme observations, et sur l'emploi d'une projection centrale.

Cette méthode de calcul permet de lier directement les coordonnées image aux coordonnées objet, sans passer par les coordonnées modèle. Elle nécessite un bloc de clichés présentant un recouvrement minimum de 60% en longitudinal, et de 20% en latéral.

D'autre part, cette méthode a un avantage considérable puisqu'elle autorise l'introduction dans le calcul de paramètres additionnels. On peut donc inclure dans le calcul les éléments d'orientations interne comme inconnues, mais aussi des paramètres de déformation de l'image, qui peut provenir non seulement des distorsions de l'objectif utilisé mais également des déformations du film, de diverses anomalies de réfraction ou de toute autre source d'erreur. Par conséquent, on tiendra compte des erreurs systématiques quelles que soient leurs origines. Ceci est particulièrement important dans le cas de l'utilisation d'une chambre de prises de vues amateur.

De fait, les qualités citées font de cette méthode la plus précise de l'aérottriangulation.

3.4.2. Calcul d'une compensation par les faisceaux

On peut donc faire intervenir un certain nombre de paramètres complémentaires afin d'affiner la détermination. Cependant, l'introduction d'inconnues supplémentaires dans le calcul demande donc que le nombre de points de calage connus soit suffisant. Les conditions de cette introduction sont développées dans la suite. Attachons-nous tout d'abord à l'explicitation de la méthode.

La matrice des coefficients des équations normales, puis la matrice N, est calculée à partir des relations de base de la photogrammétrie [6], qui expriment les coordonnées image en fonction des coordonnées objet, exprimé dans un système de référence choisi par l'utilisateur.

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad [6]$$

Ces relations font apparaître les paramètres ou variables suivants :

- (φ, η) : coordonnées image d'un point
- (X, Y, Z) : coordonnées du point dans le système objet
- (φ_0, η_0) : coordonnées image du point principal
- (X_0, Y_0, Z_0) : coordonnées du centre de projection
- r_{ij} : coefficients de la matrice rotation [A.1] (fonctions de ϖ, ϕ, κ)

Ces équations sont ensuite linéarisées pour pouvoir leur appliquer le principe des moindres carrés (voir contenu de la matrice rotation et le détail des calculs en annexe).

La forme des équations normales permet de simplifier le calcul matriciel. En effet, le système des équations normales fait apparaître une matrice constituée de blocs, ou sous-matrices, bien distincts. De plus, certaines d'entre elles étant hyperdiagonales¹, l'inversion en est facilitée.

De façon générale, le système des équations normales s'exprime sous la forme de l'expression [7], mais dans le cas étudié, on peut développer son écriture et obtenir [8].

¹ ou diagonales par blocs

$$N.x = n \quad [7]$$

$$\begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{12}^T & N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad [8]$$

Les matrices N_{11} et N_{22} sont diagonales par blocs, l'une avec des blocs (6,6), l'autre avec des blocs (3,3). On peut alors éliminer un des deux vecteurs inconnus et déterminer l'autre assez simplement [9] :

$$(N_{11} - N_{12}N_{22}^{-1}N_{12}^T)x_1 = n_1 - N_{12}N_{22}^{-1}n_2 \quad [9]$$

3.4.3. Insertion des paramètres additionnels

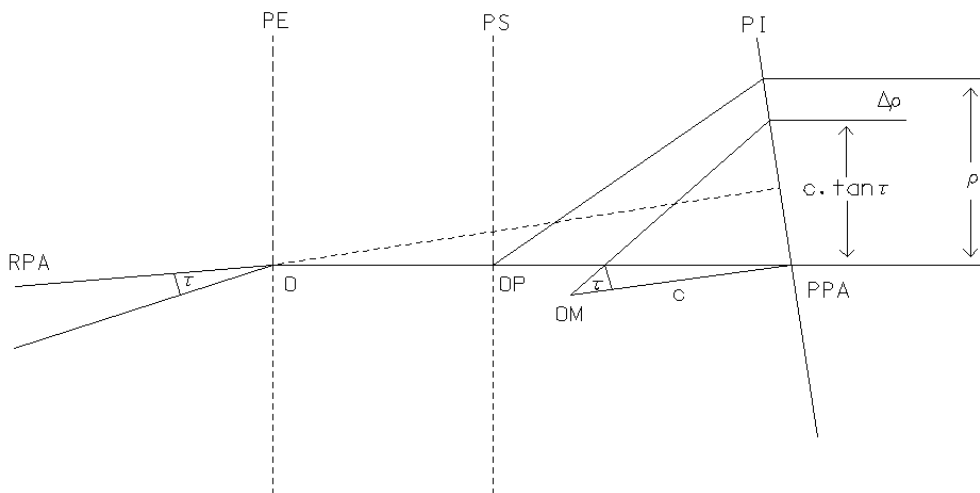
Comme précisé plus haut, les paramètres additionnels qui peuvent être inclus dans le calcul sont les données d'orientation interne, distance principale et coordonnées image du centre de perspective. On peut encore compléter la modélisation par l'insertion d'une correction $\Delta\rho$ appliquée à la distance radiale, qui corrige les distorsions de l'optique employée. Cette correction peut s'exprimer selon différents modèles mathématiques, mais le plus souvent sous forme polynomiale.

Afin d'étudier les implications de cette insertion dans le volume de calcul, il est utile de revenir aux équations de base.

Tout d'abord, exprimons l'équation de l'orientation interne [10] liant les paramètres cités ci-dessus.

$$\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2} = c \cdot \tan \tau + \Delta\rho = \rho \quad [10]$$

où τ représente l'angle d'incidence d'un rayon issu d'un point de l'objet avec le rayon principal d'autocollimation (fig. 3.6).



(fig. 3.6) Modélisation d'une chambre de prise de vues (Kraus, 1998)

RPA = Rayon Principal d'Autocollimation
 PPA = Point Principal d'Autocollimation dans le plan image
 PE = Pupille d'entrée, PS = Pupille de sortie
 OP = centre de projection physique, OM = centre de projection mathématique

$c = \text{distance principale}$, $\rho = \text{distance radiale}$, $\Delta\rho = \text{distorsion optique radiale}$

D'autre part, il s'agit de choisir une modélisation mathématique des distorsions radiales. On peut par exemple utiliser un des modèles [11] employé par le logiciel ORIENT, développé par l'Université de Graz :

$$\Delta\rho = a_3 \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{\rho^2}{\rho_0^2} - 1 \right) + a_5 \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{\rho^4}{\rho_0^4} - 1 \right) \quad [11]$$

Une telle modélisation fait intervenir une distance radiale caractéristique ρ_0 , valeur pour laquelle les distorsions sont alors nulles. Cette valeur est fixée arbitrairement, généralement aux 2/3 de la demi-diagonale de l'image, et permet de réduire les valeurs de correction. La distribution ainsi obtenue est communément qualifiée de *balanced*².

Il s'agit donc maintenant d'exprimer les corrections [12] à appliquer sur chacune des coordonnées image.

$$\Delta\xi = -\frac{\xi - \xi_0}{\rho} \Delta\rho$$

$$\Delta\eta = -\frac{\eta - \eta_0}{\rho} \Delta\rho$$

[12]

3.4.4. Conséquences de l'ajout de paramètres additionnels

Les grandes étapes du calcul général par la méthode des faisceaux étant exposées, il semble donc légitime de s'interroger sur l'effet de l'introduction des paramètres additionnels concernant les données d'orientation interne et distorsions de l'objectif.

Le plus gros risque est alors de rendre le système hyperstatique. Autrement dit, le système des équations normales ne peut être résolu. C'est là le pire des cas, mais une redondance insuffisante peut également être la source de grosses imprécisions dans les résultats issus de la compensation.

Il semble donc nécessaire d'étudier la qualité a priori, et la possibilité, de la résolution du système des équations normales. Le Pr. KRAUS propose une analyse de déterminabilité (*determinability analysis*) basée sur l'exploitation de la diagonale de la matrice N et de son inverse [13] (Kraus, 1997).

$$B = Id - [diag(N).diag(N^{-1})]^{-1} \quad [13]$$

La relation [13] fait intervenir la matrice unité (notée *Id*). Les éléments B_{ii} de la matrice B sont des mesures de la déterminabilité des inconnues. On peut signaler deux valeurs remarquables des ces éléments :

- $B_{ii} = 0$ N est une matrice diagonale
- $B_{ii} = 1$ N est une matrice singulière (non-inversible)

De façon générale, on peut fixer une limite de déterminabilité du système avec la règle suivante [14] :

$$\boxed{B_{ii} \leq 0,85} \quad [14]$$

Dans ce cas, la compensation ainsi réalisée est également appelée compensation par les faisceaux avec autocalibration.

² Logiciel PHOTODELER

4. Préparation de la mission

4.1. Reconnaissance du terrain

Le tout premier contact avec la zone d'études a été cartographique. Sur la base d'une carte IGN au 1/25000, un agrandissement au 1/10000 (cf. Annexe 2) a été réalisé afin de faciliter le repérage de la bande et des différents éléments du plan de vol.

Une fois à Barcelonnette, la partie reconnaissance du terrain a consisté à repérer les zones favorables à la mise en place de points de calage matérialisés et à analyser rapidement les possibilités de déplacement. Celles-ci se sont avérées relativement limitées pour ce qui était du pourtour immédiat du glissement, mais sur la coulée elle-même, elles ont permis un arpentage assez rapide. Les dénivellations, parfois importantes, et la nature particulièrement chaotique de la zone sont les deux paramètres qui ont, par moments, posé problème lors de la stéréopréparation.

4.2. Définition des paramètres de vol

En me basant sur les travaux réalisés par Quentin GROSS (Gross, 1998), j'ai fixé l'altitude de vol à 500m au-dessus du terrain, ce qui dans l'optique de l'utilisation d'un appareil photographique classique, muni d'un objectif de 50mm, me permettait d'obtenir une échelle de 1/10000 sur les clichés.

L'appareil employé pour le vol était un avion de type CESSNA, à ailes hautes. La vitesse de croisière envisagée était de 130 km.h⁻¹ environ, soit 35 m.s⁻¹.

Ces paramètres de vol sont d'une importance cruciale puisque c'est à partir de ceux-ci que sont calculés le plan de vol et tous les paramètres qui le caractérisent. Il est donc très important de s'y conformer autant que possible.

4.3. Choix de la chambre de prise de vues

En fonction des objectifs à atteindre, selon les contraintes imposées par les conditions de vol et grâce au panel de chambres mis à disposition par le laboratoire de photogrammétrie de l'ENSAIS, j'ai pu faire une étude sommaire de faisabilité selon chacune de ces chambres.

Pour réaliser la couverture photographique, je disposais des chambres suivantes :

- MINOLTA, 50mm (mise à disposition par O. Maquaire)
- CANON, 50mm, avec repères de fonds de chambre
- RICOH, 28mm
- PENTAX 67, 105mm

L'appareil CANON est de type reflex, la chambre RICOH est quant à elle automatique. Ces deux appareils peuvent être qualifiés de semi-métriques, car ils font apparaître quatre marques repères, en fonds de chambre, sur l'image même. Ces deux appareils permettent de travailler avec le format classique 24x36.

Par contre, la PENTAX est une chambre métrique disposant d'un réseau de croix et qui travaille avec des films de 120mm, pour un format d'image de 50x60 mm².

Dans l'étude qui suit, je parlerai soit de format vertical, lorsque le grand coté de la photo sera orienté perpendiculairement à l'axe de vol, soit de format horizontal (cette distinction peut s'apparenter à la façon de tenir l'appareil).

Les relations utilisées pour les calculs des paramètres de couverture ont été exposées au paragraphe 3.3.3, et sont utilisées pour les paramètres de vol définis, soit 500 m d'altitude pour une vitesse de 130 km.h⁻¹.

Les dimensions de la zone sont fixées à 1500 m de longueur pour 500 m de large.

4.3.1. Focale de 28mm

		Format horizontal	Format vertical
Base		100m	65m
Distance entre axes		150m	225m
dt entre prises		2,5s	<2s
Facteur d'échelle		18000	18000
Parallèle	Clichés par bande	17	15
	Bandes	5	4
Perpendiculaire	Clichés par bande	8	10
	Bandes	11	8

Tableau 1

4.3.2. Focale de 50mm

		Format horizontal	Format vertical
Base		110m	70m
Distance entre axes		215m	145m
dt entre prises		3s	2s
Facteur d'échelle		10000	10000
Parallèle	Clichés par bande	16	24
	Bandes	8	4
Perpendiculaire	Clichés par bande	7	10
	Bandes	3	11

Tableau 2

4.3.3. Focale de 105mm

		Format horizontal	Format vertical
Base		90m	75m
Distance entre axes		175m	210m
dt entre prises		2,5s	2s
Facteur d'échelle		4700	4700
Parallèle	Clichés par bande	20	22
	Bandes	5	4
Perpendiculaire	Clichés par bande	7	10
	Bandes	10	9

Tableau 3

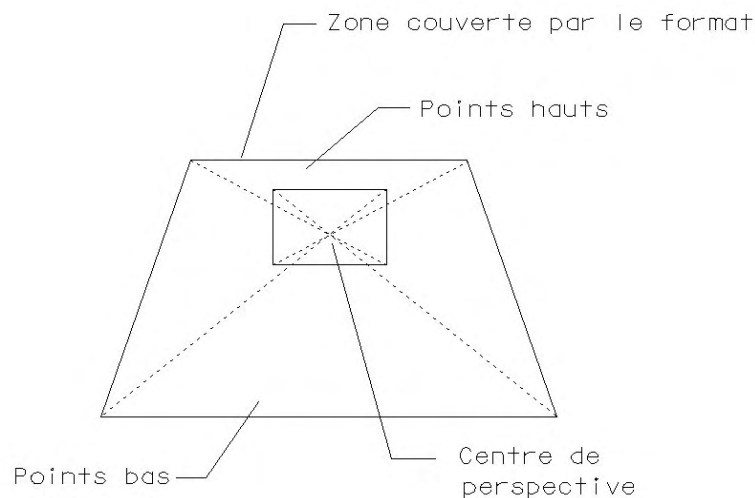
4.3.4. Conclusion de l'étude

Un critère décisif dans le choix de la chambre a été la présence de repères de fonds de chambre bien visibles sur le format. D'autant que dans le cadre de la réalisation d'un Photo CD KODAK, il faut tenir compte du fait que ce sont les diapositives qui sont scannées et que, par conséquent, une partie du format peut être rognée.

Compte tenu de l'échelle des clichés désirée, de la taille de l'intervalle de temps entre deux prises de vues et des contraintes de vol, l'emploi de l'appareil RICOH muni d'un objectif de 50mm s'est présenté comme la meilleure solution.

Pour ce qui est de la direction de l'axe de vol, la perpendiculaire à l'axe de la vallée a semblé s'imposer, du fait que la dénivelée entre le bas du glissement et le haut de la couronne est de l'ordre de 400m. Un vol parallèle à altitude constante aurait donné alors une différence d'échelle inacceptable entre les clichés extrêmes des bandes.

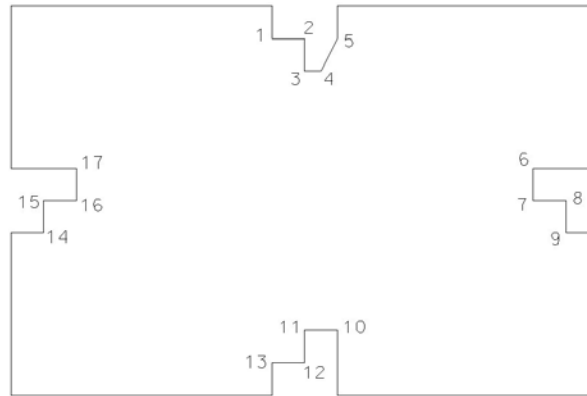
En matière de format, le choix s'est porté sur le format horizontal pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la configuration de l'avion permettait difficilement d'assurer l'immobilité de l'appareil en format vertical. D'autre part, si on considère des prises de vues verticales, la dénivelée entre le point terrain le plus haut et le point le plus bas va avoir pour effet de changer le rapport d'échelle. La projection du format d'image au sol n'est alors pas un rectangle mais un parallélogramme, ce qui provient du fait qu'une photographie est une projection centrale (fig. 4.1). Comme les prises de vues ne pouvaient, de par les moyens mis en œuvre, être strictement verticales, cette effet aurait été accentué par l'emploi du format vertical.



(fig. 4.1) Projection centrale et différences d'altitude sur le format
(Vue de dessus)

4.4. Calibration de la chambre de prise de vues

L'emploi de l'appareil reflex RICOH, du Laboratoire de Photogrammétrie de l'ENSAIS, avec un objectif de 50mm acheté pour la mission, m'a placé dans le cas le plus défavorable à savoir une chambre semi-métrique, munie d'un objectif de qualité optique inconnue. Afin de pouvoir compter sur les meilleurs résultats possibles, il a donc été nécessaire de procéder à la calibration de ce matériel.



(fig. 4.2) Marques repères de la chambre RICOH

4.4.1. Définition et intérêt de la calibration

Lorsque l'on est amené à travailler avec une chambre de prise de vues dans le but de faire des mesures sur les clichés obtenus, il est nécessaire de procéder à une calibration. C'est, dans notre cas, d'autant plus important que l'appareil utilisé est, à la base, un appareil amateur.

Une calibration permet de déterminer les corrections à appliquer sur la distance radiale, en fonction de la distance au point principal (cf. §3.4.3), ainsi que la distance principale effective pour une mise au point donnée.

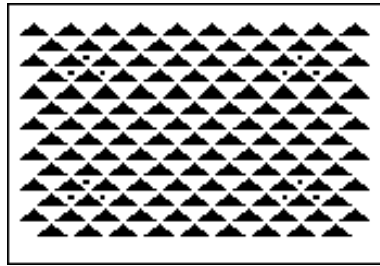
Les distorsions vont avoir pour principal effet de modifier les coordonnées images des différents points de l'image et plus particulièrement ceux qui sont situés sur les bords du format. Le nadir est peu touché par les distorsions, ce qui s'explique de par la définition de ce point d'une part, et d'autre part, se vérifie dans l'allure de la distribution des valeurs correctives (voir Graphique 1 plus bas).

Les photographies ont été réalisées avec une pellicule pour diapositives. Une fois le développement effectué, il a donc été nécessaire de scanner ces photographies afin de permettre leur traitement numérique. Ce scannage a été fait à une résolution de 1350dpi³.

4.4.2. Calcul avec PHOTOMODELER

Pour calculer une calibration avec le logiciel PHOTOMODELER, la première étape est de réaliser des prises de vue d'un réseau en damier (fig. 4.3). Le logiciel impose un nombre minimum de huit clichés, pris dans des positions précisées par sa documentation.

³ dpi : (Dots Per Inch) nombre de pixels par inch (1inch \cong 2,54cm)



(fig. 4.3) Réseau de calibration

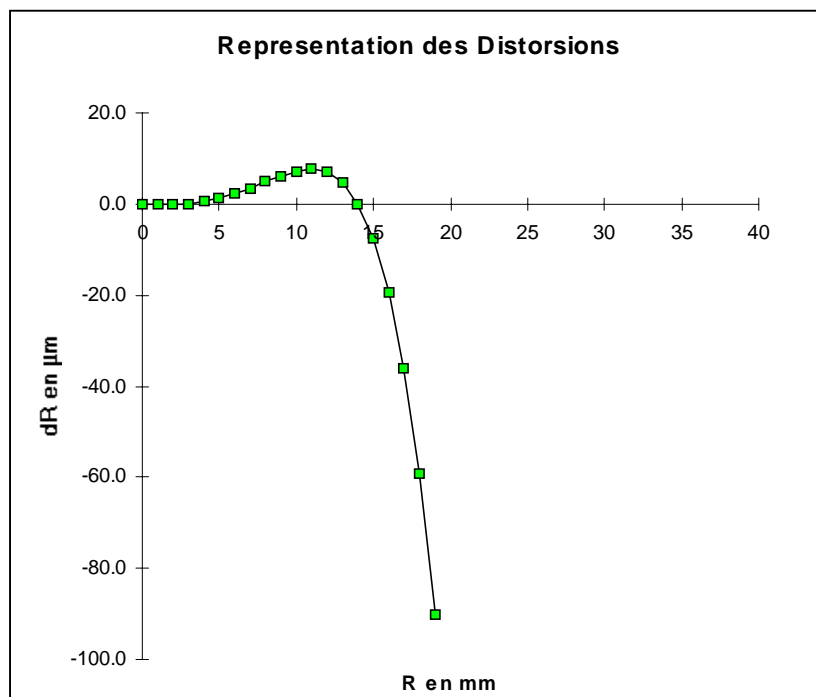
On peut cependant multiplier le nombre de clichés afin d'affiner la détermination des valeurs de distorsion.

4.4.3. Calcul avec ORIENT

Pour effectuer le second calcul de calibration avec le logiciel ORIENT, développé par l'Université de Graz, j'ai réalisé une vingtaine de prises de vues sur la façade arrière de l'aile architecture de l'ENSAIS. Cette façade comporte un réseau tridimensionnel de cibles, connues en coordonnées.

Sur les clichés numérisés, et au moyen du logiciel de photogrammétrie numérique TIPHON, développé par le Laboratoire de Photogrammétrie, j'ai pu mesurer les coordonnées photo de toutes les cibles visibles sur chacun des clichés.

Un calcul en blocs par la méthode des faisceaux a permis de déterminer les corrections. De ses valeurs on obtient la courbe de distorsion de l'objectif (Graphique 1), avec une mise au point à l'infini (les valeurs numériques des corrections de distorsions sont présentées en Annexe 2 et dans les fichiers caractéristiques de la caméra) :



Graphique 1

4.4.4. Conclusion sur la calibration

Les distances radiales des points mesurés restent en général inférieures à 18mm, les corrections de distorsions restent alors inférieures à 40 μ m. On peut donc conclure que cette optique est de qualité tout à fait acceptable pour un objectif amateur.

La distance principale calibrée, avec Orient, est légèrement différente de la focale annoncée par le constructeur, mais l'écart reste de taille prévisible. Par contre, le point principal est décalé par rapport au centre du format de façon relativement importante, la calibration fournissant les résultats suivants :

$$c = 51.837mm$$

$$\xi_0 = 0.434mm$$

$$\eta_0 = 0.161mm$$

4.5. Préparation du vol photographique

4.5.1. Les points de calage

Les points de calage à matérialiser ont été réalisés dans des plaques en carton rigide. Leurs dimensions sont d'environ 45x45 cm², soit sur les photographies au 1/10000 des marques de 45 μ m, soit environ 4 pixels, pour une résolution de 2200 dpi (cf. §6.2.1).

Le sol étant relativement sombre, constitué de marnes noires mais également de rochers, ces marques repères ont été peintes en rouge et jaune. De cette façon, on est quasiment assuré qu'elles seront visibles sur les clichés, tout en veillant à les orienter toutes dans la même direction de façon à pouvoir pointer le centre sans ambiguïté, au cas où l'une des couleurs serait invisible sur un cliché.

4.5.2. Le plan de vol

Compte tenu de la définition des paramètres de vol (altitude, vitesse) et des choix en matière de focale et d'orientation du format, j'ai pu établir le plan de vol.



(fig. 4.4) Plan de vol, sur fond de carte IGN, sans échelle

5. Opérations de terrain

5.1. Points de calage

5.1.1. Mise en place

D'après les données du plan de vol établi plus haut, il a fallu placer les balises de telle façon qu'elles soient visibles sur plusieurs clichés, en veillant de plus, à augmenter leur nombre sur un modèle pour amorcer le calcul d'aérotriangulation.

En fonction des contraintes du terrain, nous avons donc essayé de respecter les écartements fixés entre bandes, pour placer des balises à leurs extrémités. Cette opération s'est tout de même révélée plus ou moins hasardeuse puisqu'elle s'est faite au jugé, sans moyen de positionnement fin.

5.1.2. Levé

Les opérations de levé ont été réalisées par méthode tachéométrique, au moyen d'un théodolite WILD T1600, muni du distance-mètre DI3000. L'ensemble des observations a été enregistré sur module REC. Afin d'augmenter la vitesse de levé, nous avons procédé avec deux prismes. Ceci s'est avéré être un choix intéressant du fait de la taille de la zone et des difficultés de déplacement sur les pentes importantes du bassin versant.

Au cours de ce levé, nous avons stationné le pilier de centrage P2 mis en place en aval du glissement sur un promontoire rocheux. Un deuxième pilier P1 de même type est présent à proximité et a été utilisé comme point de calage pour les photographies.

Il aurait été difficile de rattacher les observations topométriques au réseau national, mais il fallait au moins pouvoir les comparer avec de précédentes campagnes d'auscultation, en tenant compte du fait que les piliers de centrage font apparaître des mouvements, dus au déplacement du glissement. En effet, le pilier P1 montre un déplacement de 1m environ, en altimétrie, par rapport aux observations de la campagne de 1997, menée par Loïc GALISSON (Galisson, 1997).

Cependant, il est important de noter que le but essentiel de cette étude est d'aboutir à une modélisation du bassin versant du glissement. Par conséquent, un quelconque rattachement au système national est tout à fait optionnel. Je me suis donc limité à exprimer les coordonnées des différents points dans le système arbitraire local, présenté plus bas.

5.2. Le vol photographique

Avec le plan et les paramètres de vol définis plus haut, il a fallu s'adapter aux conditions de vol très approximatives. En effet, l'absence de moyens de positionnement ne permettait pas une localisation très précise. Le placement sur les différents axes de vol de chaque bande s'est donc fait à vue.

L'avion a volé sur la tranche, et légèrement de biais par rapport à sa direction de déplacement. La vitesse de 130 km.h⁻¹ a été assez bien respectée, ce qui a pu être vérifiée sur les recouvrements longitudinaux. Le vol a été effectué vers 9h30, ce qui laissait à prévoir des ombres conséquentes en aval de la couronne.

Compte tenu des paramètres de vol et de la sensibilité du film (100 ISO), j'ai décidé de fixer la vitesse d'obturation à 1/1000, ce qui me permettait de réduire l'effet de filé. Pour cela, j'ai adapté l'ouverture de diaphragme en fonction de la luminosité du site, à l'aide du posemètre intégré dans l'appareil, à une valeur de f/5,6.

Traitements et analyse

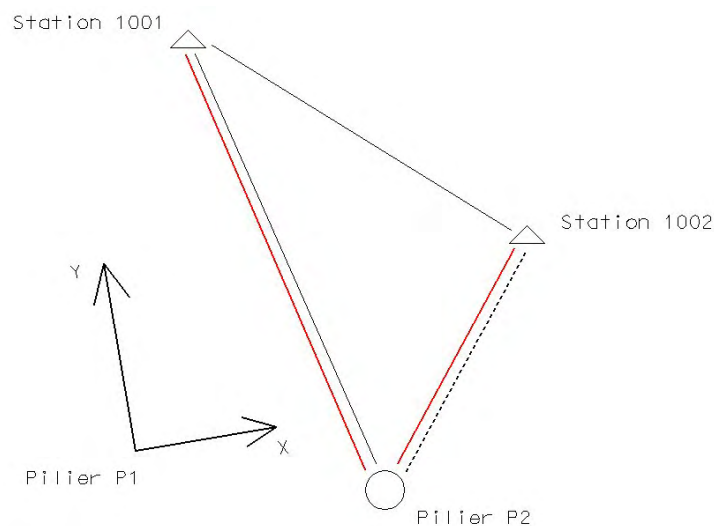
6. Exploitation

6.1. Observations topométriques

Le transfert des fichiers REC a été réalisé grâce aux modules Visual Basic écrits par Loïc GALISSON, au cours de son stage en 1997 (Galisson, 1997). Je n'ai employé que les modules de transfert et de formatage des données, les calculs de coordonnées ayant été effectués à part.

6.1.1. Calcul du réseau d'appui

Les observations du réseau d'appui ont été faites à partir d'un pilier de centrage réputé stable, situé sur un éperon rocheux en aval du glissement, et deux stations complémentaires (fig. 6.1).



(fig. 6.1) Schéma du réseau d'appui

L'origine du repère a été prise sur les coordonnées théoriques du pilier. Le gisement de référence est pris sur l'antenne de télécommunication en amont du glissement (point 3000). L'intérêt de conserver ce repère est de pouvoir assurer l'homogénéité des coordonnées obtenues avec l'ensemble des données déjà existantes sur le glissement.

Aucune compensation particulière n'a été réalisée sur le calcul des coordonnées des stations, puisqu'une visée n'a pu être observée, compte tenu de la situation du point et des impératifs de délais. Seule la station

1002 a été visée depuis le pilier P2 et la station 1001. Les écarts constatés étant de l'ordre de quelques centimètres, en planimétrie comme en altimétrie, sur des distances de plusieurs centaines de mètres. Le choix de la moyenne des deux déterminations comme coordonnées définitives semble donc justifié. Pour ce qui est des visées réciproques, les écarts sont également de cet ordre (cf. Annexe 2).

Par conséquent, l'incertitude qui subsiste sur les coordonnées des stations implantées, qui se répercute sur la précision de détermination des points de calage, reste en accord avec les exigences du traitement photogrammétrique ultérieur.

6.1.2. Calcul des points de calage

A partir des stations précédemment déterminées, et grâce aux formules de nivellement indirect classiques [14], on obtient les coordonnées des points de calage :

$$\begin{aligned} X &= X_S + D_o \cdot \sin(z) \cdot \sin(A_h + V_0) \\ Y &= Y_S + D_o \cdot \sin(z) \cdot \cos(A_h + V_0) \\ Z &= Z_S + D_o \cdot \cos(z) \end{aligned} \quad [14]$$

où (X_S, Y_S, Z_S) sont les coordonnées de la station de levé, z la distance zénithale, A_h l'angle horizontal et V_0 le gisement de l'origine du limbe.

Le levé de points doubles a permis un contrôle global du chantier. Ces points doubles présentent des écarts de quelques centimètres entre chaque détermination, ce qui est cohérent avec les écarts observés sur les stations et compatible avec les objectifs.

6.2. Couverture photographique

Afin de limiter les déformations, les pertes d'informations et de qualité d'image dues à un scannage approximatif des films développés (avec un scanner de bureautique courant, par exemple), il a été décidé de réaliser un CD Photo. Ce produit proposé par KODAK Images présente l'intérêt de libérer totalement l'utilisateur des opérations de scannage, tout en garantissant une haute résolution d'image.

6.2.1. Description des images numériques

Les images livrées sur Photo CD KODAK sont au format PCD, format propre à ce type de support. Ces images sont bien évidemment en couleur, les supports employés étant des pellicules couleur, de sensibilité 100 ISO. La résolution de scannage annoncée par Kodak est de 2200dpi, soit un pixel de 11,55 μ m.

Pour permettre le traitement photogrammétrique, il a été nécessaire de retravailler ces images pour les passer en niveaux de gris d'une part, et d'autre part, les transformer au format BITMAP (BMP). En effet, la grande majorité des logiciels de photogrammétrie numérique, comme PHOTOMOD ou TIPHON, utilise des images de ce type. Ce format leur permet de travailler en corrélation d'image, dont le principe est exposé au §3.2.3.

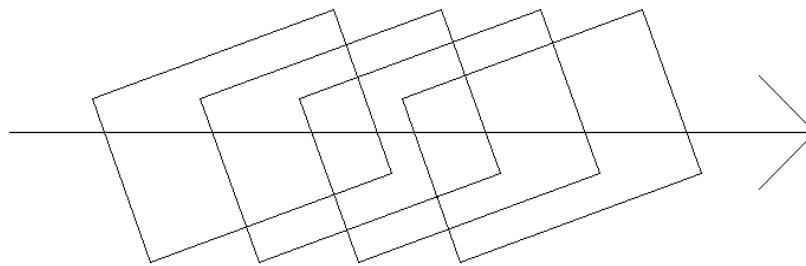
L'inconvénient de ce format d'images est généralement sa taille, surtout lorsqu'il s'agit de conserver les couleurs. L'enregistrement en niveaux de gris a donné une taille finale de 6Mo environ pour chaque image, alors que la taille de départ était comprise entre 4Mo et 5Mo (format PCD compressé).

6.2.2. Analyse préliminaire de la couverture

Une fois les CD Photo KODAK réceptionnés, la première étape des travaux de restitution a été de reconstituer les bandes (cf. Annexe 2), puis de repérer les positions des points de calage sur chaque cliché.

J'ai ensuite pu procéder à une analyse des recouvrements longitudinaux et latéraux. Cette étude a immédiatement révélé les failles du vol et de la qualité de la stéréopréparation sur la zone. En effet, il est clairement apparu que le recouvrement longitudinal était légèrement supérieur à ce qui était prévu mais sensiblement identique d'un couple à l'autre. Par contre, le recouvrement latéral s'est avéré plus aléatoire. Pour certaines bandes, il se révèle bien au-dessous des 40% espérés, alors que pour d'autres il dépasse cette valeur.

De plus, sur les bandes, on constate que la direction du vol n'était pas perpendiculaire à l'axe de la coulée. L'effet de ce paramètre, combiné à celui de la difficulté d'orienter la chambre de prise de vues parallèlement à l'axe de vol, a pour conséquence de réduire la surface de recouvrement des clichés (fig. 6.2)



(fig. 6.2) Position des clichés sur la direction de vol

En ajoutant à cette constatation, l'effet de la différence d'altitude entre le haut et le bas de la zone couverte (fig. 4.1), on voit clairement que la surface de recouvrement est encore modifiée.

Ces différentes constatations mettent donc en évidence le manque de moyen de positionnement, soit la faiblesse des alignements et des évaluations de distances entre passages. Un dispositif, tel un GPS embarqué, aurait permis un contrôle, quasiment en temps réel, de la position de l'appareil, de l'azimut de l'axe de vol, et éventuellement de sa vitesse.

Il est effectivement difficile pendant le vol, d'apprécier de façon suffisamment fine la direction de déplacement de l'avion pour réorienter la chambre de prise de vues. Il en est de même pour les variations de vitesse, la hauteur par rapport au sol...

D'autre part, le point de vue élevé obtenu depuis un avion change considérablement la perception de la topographie et de la morphologie d'un site. Ceci est encore accentué lorsque l'on a seulement une vision monoculaire, ce qui est le cas quand on utilise le viseur d'un appareil photographique.

6.2.3. Choix des clichés et des bandes

A partir des miniatures fournies avec le CD Photo, j'ai pu choisir les clichés à utiliser dans la composition de chaque bande. Ce choix a été fait de telle façon que le recouvrement longitudinal soit d'au moins 60%. Par conséquent, le nombre de clichés disponibles étaient bien supérieur au nécessaire pour certaines bandes.

7. Le logiciel PHOTOMOD

7.1. Descriptif sommaire

PHOTOMOD est un logiciel de photogrammétrie numérique, fonctionnant sur PC équipé du système d'exploitation MS Windows 95, destiné à l'observation en relief, à la mesure 3D, à la création de modèle numérique de terrain, d'ortho-images...

Les données d'entrée sont des couples d'images stéréoscopiques, sous forme numérique, sur lesquels se fondent les calculs de modèles spatiaux. La création d'un modèle spatial consiste en fait à projeter les deux images dans un espace à trois dimensions, et permet ensuite les différents traitements cités ci-dessus.

Dans cette partie, je n'exposerai que les grandes lignes du protocole opératoire établi et suivi, les choix de modélisation et les solutions développées face aux divers problèmes qui se sont posés. Les différentes étapes présentées ici sont similaires à celles réalisées avec d'autres logiciels ou des restituteurs analytiques. La mise en œuvre est intégralement détaillée dans le fascicule intitulé 'Saisie et calcul d'aérotriangulation sous PHOTOMOD' joint en Annexe 1.

Toutes les informations saisies ou calculées pendant les traitements d'un couple sont écrites dans un fichier base de données (.pdb), pouvant être édité en mode texte. Une telle base de données peut référencer plusieurs couples, mais cette fonctionnalité n'est pas utilisée dans le cas d'une saisie d'aérotriangulation.

7.2. Protocole opératoire

7.2.1. Exigences

Les modules d'aérotriangulation de PHOTOMOD n'ayant jamais été utilisés au Laboratoire de Photogrammétrie, j'ai donc commencé par établir le protocole opératoire. Celui-ci devait répondre à un certain nombre de critères afin d'assurer la rapidité et la fiabilité de la saisie.

Le premier aspect à considérer est l'orientation interne. En effet, lors de la saisie des couples pour l'aérotriangulation, un même cliché intervient deux fois : la première en cliché de droite, la seconde en cliché de gauche. Il est donc intéressant de pouvoir récupérer les résultats d'orientation interne de chaque cliché, ce qui évite alors une nouvelle orientation et assure l'homogénéité des mesures sur une même photographie, dans des modèles différents.

Un autre aspect, essentiel lors d'une saisie d'aérotriangulation, est la qualité du pointé sur les points de jonction et de calage. C'est ici d'autant plus essentiel que l'apparence assez uniforme des photos, dans certaines zones, et le manque de détails très nets peuvent être des sources d'erreur de pointé assez importantes. Si on considère en plus la qualité moyenne de l'objectif, on voit qu'il est capital que les différents points soient saisis le plus soigneusement possible. Il s'agit alors de reporter les mesures issues du cliché de droite d'un couple sur ce même cliché, à gauche, dans le couple suivant.

7.2.2. Mise en œuvre

La première étape pour tout travail photogrammétrique est de réaliser l'orientation interne. Celle-ci est à faire pour chacun des clichés utilisés, du fait que la position du film dans le support de diapositive n'est pas forcément la même pour tous.

On réalise ensuite l'orientation relative qui a pour but de créer un modèle plastique afin de permettre la visualisation en relief. PHOTOMOD la concrétise par la possibilité d'observation avec des anaglyphes.

D'après les principes du calcul en blocs par la méthode des faisceaux, cette étape n'est pas nécessaire (cf. Annexe 2), mais s'avère plus efficace dans le cadre du projet.

Pour terminer, on saisit les points de calage et de jonction, soit en mode stéréoscopique, ce qui permet de mesurer simultanément les coordonnées du point sur les deux clichés, soit en exploitant les capacités du logiciel en matière de corrélation d'image. Cette saisie est alors considérablement accélérée.

7.3. Orientation interne

7.3.1. Procédure générale

Lors du lancement de la procédure d'orientation interne, la première étape à franchir est la spécification du taux d'échantillonnage des images d'entrée. Cette valeur est des plus importantes car c'est grâce à elle que seront calculées toutes les coordonnées et distances, en système image (unité : μm ou mm), à partir des mesures en pixels.

Il s'agit ensuite de définir le système image, en pointant les repères de fonds de chambre. PHOTOMOD offre la possibilité de ramener les distances mesurées entre repères aux distances vraies, par l'application d'un coefficient d'échelle. Ceci permet de compenser une éventuelle incertitude sur la valeur du taux d'échantillonnage et de se rapporter rigoureusement au système de coordonnées image réel, issu de la calibration.

Sous PHOTOMOD, le seul indicatif de qualité de cette étape est la valeur des coefficients d'échelle appliqués. Lorsque ceux-ci sont inférieurs à 0,99 une erreur de saisie est alors à envisager. On dispose aussi de l'angle d'intersection des droites issus des marques repères saisis, mais dans le cas présent, cette valeur est peu exploitable.

7.3.2. Le point principal : problématique

Le système de coordonnées image réel admet pour origine le point principal d'autocollimation. PHOTOMOD le calcule par intersection des droites passant par les repères saisis sur des cotés opposés du format. Ce point est alors pris comme point principal. Hors, comme le montre la figure (fig. 4.2) et les coordonnées réelles de ces repères (cf. Annexe 2), il est impossible de déterminer les coordonnées du point principal par cette méthode, qui de plus, ne peut tenir compte de la calibration.

Il s'agit donc d'opérer une translation du point principal ainsi déterminé, afin de le ramener sur le point principal d'autocollimation, connu par calibration.

7.3.3. Solution

Les données dont je disposais pour résoudre ce problème, dont dépendait toute la qualité du travail qui s'ensuivait, étaient les suivantes :

- Coordonnées réelles des repères de fonds de chambre
- Coordonnées réelles du point principal d'autocollimation
- Coordonnées pixel du point principal calculé par intersection
- Taux d'échantillonnage des images

A partir des coordonnées réelles des repères de fonds de chambre, on peut calculer l'intersection des droites qui en sont issues, de la même façon que le fait PHOTOMOD. Des coordonnées de ce point d'intersection on peut alors déduire les valeurs des corrections dx et dy à leur apporter, afin de se ramener au point principal d'autocollimation.

Ces corrections sont ensuite transformées en pixels, grâce au taux d'échantillonnage, et appliquées aux coordonnées pixel issues du point calculé par le logiciel. En conclusion, on force les coordonnées du point principal d'autocollimation afin de garantir les résultats ultérieurs

7.3.4. *Correction des distorsions radiales*

L'étape de l'orientation interne n'est alors terminée que lorsque sont saisies la distance principale et la table de correction des distorsion radiales, si une calibration a été effectuée. Rappelons que ces corrections s'appliquent sur les distances radiales, mesurées à partir du point principal d'autocollimation.

Le traitement automatique qui est opéré pour la saisie d'aérotriangulation permet en fait de ne saisir qu'une seule fois cette table. Il faut cependant à chaque démarrage de saisie par bande, ajouter manuellement la ligne de référence au fichier de correction dans la base de données.

7.4. Orientation relative

7.4.1. *Amorçage de la saisie*

On commence par saisir trois points homologues sur le couple. Le logiciel propose deux méthodes pour ceci : introduction manuelle (pas de contrôle des pointés) ou par corrélation. Il calcule alors un coefficient de corrélation, basée sur l'analyse radiométrique d'une matrice de pixels centrée sur le point et qui caractérise la correspondance entre les deux homologues. Le second coefficient calculé est une valeur de dispersion qui caractérise la spécificité du point.

7.4.2. *Saisie automatique*

La saisie automatique de points est basée sur un algorithme de corrélation d'images simple. Il suffit de définir une grille et un seuil minimum de corrélation. Le logiciel va alors chercher des points homologues à proximité des nœuds et valider les couples présentant un coefficient de corrélation supérieur au seuil.

Ce procédé est généralement relativement sûr pour des photos présentant une échelle, une luminosité et un contraste similaires.

7.4.3. *Calcul de l'orientation relative*

Une fois que le nombre de points est suffisant, on peut lancer le calcul en modélisation normale. Les autres types de modélisation vont, soit rendre les mesures impossibles, soit ajuster la distance principale donc passer au travers des résultats de calibration. Ces conséquences rendent donc ces méthodes inapplicables dans le cas traité.

Le calcul fournit une parallaxe verticale résiduelle maximale, et le nombre de points mauvais. On répète le calcul du modèle jusqu'à ce que la parallaxe soit de l'ordre de 0,10 à 0,15 pixels, pour une centaine de points utilisés dans le calcul.

7.4.4. *Rééchantillonnage des images*

Une fois que l'orientation relative fournit des résultats satisfaisants, leur sauvegarde génère un rééchantillonnage des images. Cette opération a en fait pour but de créer le modèle 3D, qui sera observable avec les anaglyphes. Il faut donc qu'un objet quelconque ait la même taille sur chacun des clichés.

PHOTOMOD propose deux méthodes pour réaliser cette opération : la méthode bilinéaire, exposée plus haut, et une méthode sub-pixellaire. D'après les documentations et ses caractéristiques, la première transformation est la plus rapide et la mieux adaptée pour des mesures ultérieures.

7.5. Aérotriangulation

7.5.1. Saisie de l'aérotriangulation

La saisie des points d'aérotriangulation s'est faite par bandes, en enchaînant les modèles. Une fois le premier modèle intégralement réalisé, le programme de transfert des données vers le couple suivant permet de s'affranchir de la saisie de l'orientation interne du cliché de gauche, ainsi que des pointés sur les points de calage et de jonction issus du modèle précédent.

A l'issue de l'orientation relative, on opère une recherche automatique des points de calage et de jonction par corrélation. La majorité des points se trouvant dans la zone de recouvrement sont trouvés, avec un coefficient de corrélation minimum de 0,95. Il faut cependant vérifier ces résultats en mode stéréoscopique, afin de supprimer les points intégrés mais n'étant pas sur le modèle calculé et saisir les points supplémentaires.

7.5.2. Préparation du calcul

Grâce aux modules d'aérotriangulation, PHOTOMOD propose une suite très complète de calculs photogrammétriques, permettant de traiter, dans la version actuelle, des blocs de 200 clichés.

Avant de lancer le programme de liaison PHOTOMOD => AEROTRIANGULATION, il s'agit de générer deux fichiers :

- aphoblo.ae1 : qui référence les fichiers pdb à utiliser, les numéros de photos, et les chemins d'accès aux répertoires
- aphodat.ae1 : qui référence les données d'aérotriangulation.

Les données d'aérotriangulation comprennent les coordonnées et précisions, terrain, des points de calage, les coordonnées approchées et des précisions à priori sur les points de jonction. On trouve également les valeurs approchées des coordonnées du centre de perspective de chaque cliché, ainsi que des trois rotations (Ω, ϕ, κ) de la chambre de prise de vues.

Les précisions à priori sur les points de jonction ainsi que sur les données d'orientation externe doivent être interprétées comme une définition d'intervalle de confiance. En effet, le logiciel va utiliser ces valeurs comme l'écart maximal admis entre deux déterminations par deux itérations successives. Par conséquent, pour assurer des valeurs cohérentes en fin de traitement, ainsi que sa convergence, il faut veiller à bien adapter ces valeurs à la façon dont sont déterminées les coordonnées approchées.

Ce premier module a pour fonction de générer le fichier bundle.aer, qui récapitule toutes les mesures, valeurs approchées, données et précisions nécessaires au calcul d'aérotriangulation en bloc par la méthode des faisceaux (*bundle block adjustment*).

7.5.3. Calcul des données d'orientation externe

Plusieurs méthodes ont été appliquées afin d'obtenir des valeurs approchées de données d'orientation externe. La première a été de calculer la moyenne des coordonnées des points de calage visibles depuis chaque cliché. Les moyennes planimétriques et la moyenne altimétrique augmentée de 500m, hauteur de vol, ont été affectées au centre de perspective du cliché considéré. Pour les valeurs de rotation, j'ai fixé les valeurs de ϖ et ω à 0gon, dans l'hypothèse de prises de vue verticales, avec un appareil horizontal. Par contre, κ a été déterminé en fonction de l'azimut des axes de vol, considérés alors parallèles, et fixé à la valeur de -60gon.

Du fait de ces déterminations grossières, il a alors été nécessaire d'attribuer des intervalles de confiance particulièrement larges, afin de ne pas provoquer une divergence du calcul. Sachant que le format couvre environ une zone de 300m par 400m, la largeur de l'intervalle a été fixée à 300m.

La seconde méthode mise en œuvre a été la transformation linéaire directe (DLT). Celle-ci est exposée en Annexe 2. Elle nécessite un minimum de six points de calage mesurés par cliché, et par conséquent, cette détermination n'a pu être appliquée sur l'ensemble des clichés du bloc. Les autres valeurs ont été interpolées à partir des distances théoriques entre bandes et entre clichés.

Le gros problème de cette détermination est le manque d'homogénéité, en matière de précision et d'erreur moyenne quadratique sur les valeurs obtenues. Il est alors difficile, voire hasardeux, d'attribuer des valeurs d'intervalles de confiance aussi arbitrairement que précédemment. En effet, des valeurs trop faibles vont privilégier les résultats de la DLT, mais les valeurs interpolées risquent de faire diverger le calcul. Par contre des valeurs élevées ne tiendront pas compte de la qualité de la DLT, et placeront le calcul dans le cas le plus défavorable, la convergence n'étant pas assurée pour autant.

7.5.4. Calcul de l'aérotriangulation

Avec le fichier `bundle.aer`, on peut alors calculer le bloc. A l'issue de ce traitement, un grand nombre de fichiers sont créés, chacun donnant des informations bien précises sur le déroulement et les résultats du calcul.

Le fichier des itérations (`iter.txt`) présente l'évolution des valeurs de correction appliquées aux données d'aérotriangulation, afin que tous les points terrain et leurs saisies images satisfassent à la règle de colinéarité. La valeur significative d'une itération est finalement l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids, calculée à partir des coefficients de la matrice des écarts. C'est cette valeur qui permet de savoir si le calcul a convergé correctement ou non.

Les véritables résultats numériques du calcul, à savoir les coordonnées des points de jonction, et éventuellement les données d'orientation externe, se trouvent dans le fichier `points.txt` pour les premiers, et dans le fichier `camera.txt` pour les seconds. L'exploitation de ces fichiers peut être très intéressante lorsque l'on veut affiner le calcul en prenant ces déterminations comme nouvelles valeurs approchées, et en ajustant les précisions a priori en fonction.

En cas de divergence du calcul, le module s'arrête généralement à la deuxième ou troisième itération et génère un fichier résultat où il indique l'échec du calcul. L'inconvénient de ces cas est qu'aucun fichier n'est généré complètement ce qui exclut toute analyse. Il faut alors relancer le module en conservant tous les résultats des itérations précédentes. Le module va en fait s'en servir pour redémarrer le calcul. Lorsque le calcul ne converge toujours pas, on peut alors soupçonner une erreur de pointé ou de numérotation de points.

7.6. Programmation de modules complémentaires

L'écriture de ces petits modules complétant l'arsenal logiciel de PHOTOMOD a été faite en VISUAL BASIC 5.0. L'emploi de ce langage permet la création aisée d'interfaces utilisateur sous formes de boîtes de dialogue, très courantes dans l'environnement MS-WINDOWS. VISUAL BASIC est un langage orienté événement, ce qui permet de travailler avec assez peu de variables, de manipuler des objets plus ou moins complexes pour en extraire facilement les données nécessaires aux traitements.

Le code source de chaque programme est fourni en Annexe 2, et sur le CD #2, de l'Annexe 3.

7.6.1. Correction du point principal d'autocollimation

Comme exposé plus haut, ce programme a pour fonction de calculer les corrections dx et dy à apporter à la détermination faite par PHOTOMOD du point principal, à partir des coordonnées mesurées des repères de fonds de chambre. Il utilise en référence un fichier contenant les coordonnées image réelles des 17 points disponibles sur le format.

Ce programme intègre les coordonnées du point principal obtenues par calibration dans le calcul de la translation.

Cependant, le code de ce programme n'a pas été poussé à son maximum d'automatisation, puisque l'opérateur doit recopier les résultats qu'il fournit dans les champs de coordonnées du point principal de la fenêtre d'orientation interne. Ceci permet tout au moins d'avoir un contrôle sur les nouvelles données.

7.6.2. Transfert des données entre couples

Lorsqu'un couple a été entièrement saisi, on passe alors au couple suivant. Le cliché de droite devient alors celui de gauche. Ce programme a pour but de récupérer dans la base de données les résultats d'orientation interne, le chemin d'accès au fichier de correction des distorsions radiales, ainsi que les coordonnées images (droite) des points de référence. Ces informations sont alors recopiées dans la nouvelle base de données, pour le cliché de gauche.

Ce programme, comme le précédent utilise les fonctions de base du langage aussi bien en matière d'entrée/sortie que de structures de contrôle.

Il doit écrire en accès séquentiel un fichier en mode texte. D'autre part, l'architecture du programme est telle que l'on ne peut faire deux transferts successifs dans la même base de données. Dans un tel cas, il y aurait duplication d'information et le fichier serait illisible par PHOTOMOD.

7.6.3. Création du fichier de références

Le fonctionnement de ce programme est relativement simple : on lui fournit le chemin du répertoire où se trouvent les fichiers de base de données pour qu'il crée une liste des fichiers présents. Il va alors créer le fichier texte (aphoblo.ae1) dans lequel il inscrira toutes les informations : tout d'abord le chemin d'accès au répertoire de travail, où il copie la totalité des fichiers, et le chemin du répertoire de sauvegarde, où sont également copiés les fichiers. Le programme AEROT pour le calcul d'aérotriangulation n'utilisera ensuite que les fichiers du répertoire de travail. On conserve donc deux copies des fichiers, ce qui, vu le temps nécessaire à leur élaboration, n'est pas une précaution superflue.

Ensuite, dans chaque base de données, il extrait les numéros de clichés, les formatent et les inscrit dans le fichier de référence. Chaque ligne de ce fichier comprend finalement les numéros des clichés du couple et le nom de la base de données le concernant (sans l'extension .pdb).

7.7. Orientation absolue

7.7.1. Rappels

Cette étape a pour but de calculer la transformation de similitude spatiale, qui autorisera la création des modèles numériques de terrain, référencés dans le système local.

D'une manière générale, il faut être conscient qu'une orientation absolue requiert un minimum de deux points en planimétrie et trois en altimétrie, non situés sur la même droite. Cependant, pour que les erreurs moyennes quadratiques issues du calcul aient une signification par rapport au résultat final, il est bon de veiller à conserver une certaine surabondance.

7.7.2. *Mise en œuvre*

Les résultats de l'aérotriangulation étant automatiquement transférés dans les fichiers de base de données, on peut alors relancer le module d'orientation pour chaque couple, afin de calculer l'orientation absolue. PHOTOMOD propose alors un certain nombre d'options pour effectuer ce calcul. Les résultats d'aérotriangulation fournissent une valeur de base, mais en fonction des précisions calculées sur les données d'orientation externe, on peut choisir d'utiliser cette valeur ou non.

Le fait d'ignorer cette valeur permet de donner plus de souplesse au calcul du modèle spatial, qui peut alors être ajusté en profondeur. Lors de l'affichage des résultats d'orientation absolue, avec ajustement des coordonnées et de la base, on peut constater que les paramètres concernant la base font apparaître des écarts faibles avec l'aérotriangulation en planimétrie (inférieurs au mètre) alors qu'ils sont beaucoup plus importants en altimétrie (jusqu'à 25m). Cependant, les erreurs moyennes quadratiques résultantes sont meilleures qu'avec l'emploi de la base fixe.

L'analyse des résultats d'orientation, les erreurs moyennes quadratiques mais surtout les écarts maximums sur les trois axes, permet d'identifier la présence d'éventuels points faux ou douteux. Dans ce cas, on commence par les éliminer du calcul d'orientation absolue, et éventuellement, on peut les saisir à nouveau et relancer une aérotriangulation, lorsque cela semble nécessaire. Il est tout de même à noter qu'une telle reprise serait alors des plus lourdes à opérer.

Il est impératif d'utiliser la même méthode de calcul de l'orientation absolue pour tout le bloc. En effet, la génération des modèles numériques de terrain s'appuie sur ces résultats, et il faut que les modèles soient cohérents entre eux afin de pouvoir assurer les jonctions et produire le modèle global.

7.8. Génération du modèle numérique

Lorsque le modèle tridimensionnel est calculé, on peut dès lors entamer la génération du modèle numérique de terrain, en employant le module DTM (Digital Terrain Model) de PHOTOMOD.

7.8.1. *Spécification de la grille de calcul*

Pour permettre au logiciel de calculer ce modèle, il faut lui spécifier les paramètres de maillage de la grille. Le logiciel va alors déterminer le modèle fil de fer par triangulation des points dans l'espace en mesurant les coordonnées tridimensionnelles des nœuds de la grille¹.

PHOTOMOD propose plusieurs types de grilles :

- Régulière : calcul de l'altimétrie du nœud par corrélation entre les deux images ou par interpolation des points adjacents.
- Adaptative : maillage planimétrique non régulier servant de base à une triangulation selon un algorithme de Delaunay modifié
- Lissée : création d'une surface interpolée en utilisant des points créés sur l'image stéréo. Cette méthode n'est applicable que pour les faibles reliefs, ne présentant qu'un faible nombre de points caractéristiques.

Afin d'utiliser le maximum du format de l'image et du modèle stéréoscopique, l'emploi d'une grille régulière semble être la meilleure solution. D'autant plus que la documentation recommande son utilisation dans le cadre d'images hétérogènes caractérisées par une structure de granularité petite, avec des détails très fins et une parallaxe moyenne.

L'emploi de la grille adaptative permet quant à elle de spécifier des points jugés caractéristiques de la zone. On peut alors forcer la triangulation à prendre en compte des traits morphologiques précis comme

¹ PHOTOMOD 1.52 – Module MNT, p.11 et suiv., Manuel de l'utilisateur

les thalwegs, les lignes de crêtes ou plus généralement, des points hauts ou des points bas. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans l'obligation de saisir tous ces points, en mode stéréoscopique. Dans le cas contraire, le modèle numérique de terrain généré éludera totalement les zones dépourvues de points.

7.8.2. Calcul et modifications du modèle

Les calculs des MNT ont été réalisés avec des grilles de 25x25 jusqu'à 30x30 croix pour les zones les plus étendues, placées sur les zones à modéliser en priorité. La génération de l'altimétrie des points de la grille par corrélation d'image pouvant échouer ou être entachée de grosses erreurs d'interpolation, le modèle peut être complété par des points restitués manuellement.

Saisis en mode stéréoscopique, ces points peuvent alors être choisis de telle sorte que le modèle soit forcé de prendre en compte les lignes et points caractéristiques. Ainsi, on peut limiter les interpolations excessives dans les zones où la corrélation échoue et retrouver les lignes structurales du relief.

7.9. Création d'une orthophotographie

L'utilisation du module DTM de PHOTOMOD permet la création quasi instantanée de l'ortho-image. Cette opération revient en fait à considérer la photographie comme une texture que l'on applique au modèle numérique, en ajustant le tout sur les points de calage et les points de la grille d'interpolation.

L'image peut ensuite être enregistrée au format BMP, avec un certain nombre de surcharges comme les points de calage, les courbes de niveau ou la grille d'interpolation.

8. Présentation et analyse des résultats

8.1. Orientations internes

L'étape d'orientation interne n'a généralement pas posé de problèmes particuliers, mis à part les couples où les repères visibles d'un cliché à l'autre n'étaient pas les mêmes. Ces cas ont nécessité quelques manipulations supplémentaires pour la spécification des paramètres de mise à l'échelle des images.

Cette orientation n'étant réalisée que sur quatre points, les écarts ne sont alors que peu significatifs. De plus, PHOTOMOD ne fournissant que les coefficients d'échelle pour apprécier la qualité de la saisie et étant donné le contour, parfois très flou, des marques repères, il a été quelque fois difficile de déterminer quel point pouvait être défectueux.

De plus, ces coefficients d'échelle sont une quantification partielle des déformations engendrées par le scanner. La calibration de ce dernier étant inconnue, leur interprétation en est d'autant plus difficile.

De manière plus générale, on peut reprocher à la procédure d'orientation interne d'être assez peu transparente, rigide, et très discutable en ce qui concerne la définition du point principal.

8.2. Orientations relatives

L'orientation relative a été réalisée de façon systématique au moyen de la corrélation d'image. Elle a donc utilisé un grand nombre de points (une centaine au minimum) ce qui a permis de réduire la parallaxe verticale résiduelle maximale aux environs de 0,15 pixels, ou moins.

De tels résultats ont permis la création de modèles stéréoscopiques fiables. Ceci a pu se vérifier lors de la saisie des points de calage et de jonction : l'écart entre les pointeurs gauche et droit était extrêmement faible, sachant qu'il fallait opérer des zooms très forts afin de le constater de façon significative.

8.3. Aérotriangulation

8.3.1. Premières constatations

Malgré le protocole établi, les programmes complémentaires, les corrections établies puis appliquées, le calcul de l'aérotriangulation est globalement un échec.

Les diverses tentatives n'ont pas établi de façon claire les failles du protocole opératoire. En effet, un doute pourrait être émis sur la qualité de l'orientation interne, en particulier pour la détermination des coordonnées pixel du point principal d'autocollimation. Cependant, du fait de l'opacité des méthodes de calcul, il est quasiment impossible de savoir si cette détermination, combinée aux corrections de scannage et de distorsions radiales, peut être considérée comme juste ou non.

8.3.2. Obtention des résultats

Les données résultantes ont été obtenues par le support technique de CHS-CARTO France, par le biais de certaines simplifications. En effet, la convergence du calcul a été obtenue en fixant les coordonnées du point principal d'autocollimation à des valeurs arbitraires de 1536 pixels en x et 1024 en y. Ceci revient finalement à placer ce point capital au centre de l'image numérique, sans tenir compte de la position du film dans le support de diapositive au moment du scannage (cf. §7.3.2). Autrement dit, le calcul réalisé passe outre l'étape fondamentale de l'orientation interne.

D'autre part, les valeurs de correction des distorsions radiales n'ont pas été prises en compte. Avec l'approximation précédente, le calcul ne tient alors plus compte des résultats de calibration de la chambre de prise de vues.

L'essentiel du problème semble finalement reposer sur la suspicion grevant la détermination du point principal d'autocollimation, car toutes les opérations préparatoires au calcul de l'aérotriangulation découlent de sa localisation.

8.3.3. *Qualité des résultats*

Les résultats obtenus par le calcul d'aérotriangulation sont d'une qualité assez moyenne, à laquelle on pouvait néanmoins s'attendre, étant données les approximations précédentes, la qualité des optiques utilisées et les conditions de prises de vues.

Les fichiers de résultats et de suivi de la convergence du calcul (iter.txt, points.txt) font apparaître, après dix itérations, les erreurs moyennes quadratiques suivantes :

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= 1.87 \text{ m} \\ \sigma_0^X &= 1.291 \text{ m} \\ \sigma_0^Y &= 1.746 \text{ m} \\ \sigma_0^Z &= 1.337 \text{ m}\end{aligned}$$

La première valeur est l'indicateur général de la qualité de l'aérotriangulation, alors que les trois suivants constituent l'erreur de détermination moyenne des points de calage grâce à leurs coordonnées image. De plus, le fichier points.txt fait apparaître pour tout point les précisions de l'ajustement de ses coordonnées, en ajoutant les écarts finaux observés avec les valeurs théoriques, pour les points de calage.

Concernant les données d'orientation externe, leurs valeurs sont présentées dans le fichier camera.txt. On peut noter ainsi le mouvement global de l'avion pendant les prises de vues en s'attardant sur les grandes variations du κ , comme sur la bande 2 par exemple. Mais on remarque également les incertitudes élevées concernant les rotations, couplées à des écarts importants des coordonnées des centres perspectives par rapport à leurs valeurs approchées. Connaissant les méthodes de détermination de ces valeurs approchées (cf. 7.5.3), un tel fichier est alors inexploitable en terme d'interprétation de la précision du calcul.

8.4. Orientations absolues

L'utilisation des fichiers pdb complétés par le module d'aérotriangulation permet théoriquement d'aborder sereinement la phase d'orientation absolue. Cependant, c'est cette étape qui va établir la relation entre coordonnées du centre de perspective, coordonnées image et terrain des points, et ainsi valider d'une part le levé tachéométrique des balises, et d'autre part, la qualité des déterminations fournies par l'aérotriangulation.

8.4.1. *Homogénéité des résultats d'orientation*

Tous les points issus de l'aérotriangulation possèdent leur précision propre. De ce fait, leur influence est différente dans l'orientation de chaque couple. Par conséquent, chaque orientation est indépendante et n'utilise donc pas les mêmes points. Ceci pose alors un problème d'homogénéité des résultats sur l'ensemble du bloc. Ce problème s'est fait ensuite ressentir dans la génération des modèles numériques, et plus particulièrement dans les zones de jonction.

D'autre part, j'ai été confronté à certaines incohérences qui semblent, a priori, venir du transfert des résultats d'aérotriangulation dans les bases de données. En effet, les orientations absolues devaient être calculées en utilisant l'option de la base fixe (cf. §7.7.2). Pour certains couples, le calcul a échoué et produit un message d'erreur stipulant une erreur dans les coordonnées des points de référence ou une erreur de saisie de points homologues. Ces couples ont finalement été calculé sans tenir compte de la base, avec réalisation d'un ajustement sur les X, Y, Z. Par suite, la précision finale sur le modèle tridimensionnel est moins bonne que pour les couples calculés en base fixe.

Le protocole suivi semble laisser peut de chance à la faute de saisie des points. Mais le plus déconcertant est que l'échec d'une méthode de calcul pour un couple n'empêche pas le succès de ce même calcul, pour le couple suivant ou précédent qui, a fortiori, utilisent les mêmes données de référence, à quelques points prêts.

8.4.2. Analyse des résultats

Sur l'ensemble du bloc, on constate finalement en altimétrie des erreurs moyennes quadratiques de l'ordre de 50 à 70 cm, pour les cas calculés en base fixe. Lorsque les coordonnées de la base n'ont pas été prises en compte on observe alors des erreurs moyennes quadratiques de l'ordre du mètre.

Pour la planimétrie, les erreurs moyennes quadratiques constatées sont plus faibles qu'en altimétrie. Ceci peut s'expliquer en rapportant le travail effectué au cas normal de la photogrammétrie (cf. §3.1.3) et en observant l'expression de ces erreurs [15].

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{\xi}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_b \sigma_\xi)^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{\eta}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_\xi}\right)^2 + (m_b \sigma_\eta)^2} \\ \sigma_z &= \frac{Z^2}{cB} \sigma_{p_\xi}\end{aligned}\quad [15]$$

Ces expressions mettant bien évidence l'importance des mesures des coordonnées image, de la détermination de la base et de la calibration de la chambre, on peut alors mieux comprendre d'une part les disparités entre précision altimétrique et planimétrique, et d'autre part, l'influence de la valeur de base sur la précision du positionnement.

8.4.3. Conclusions sur l'orientation absolue

Mis à part les couples orientés sans tenir compte de la base, l'orientation absolue des clichés du bloc apparaît comme étant de bonne qualité. Il faut en effet la rapporter non seulement aux conditions de prises de vues, mais aussi à la détermination des données d'orientation externe.

Le fait que le calcul d'orientation absolue fournisse, dans les meilleurs cas, des écarts maximaux inférieurs au mètre sur les trois axes, permet d'accorder une certaine confiance à l'aérotriangulation, malgré les approximations signalées précédemment. Cependant, j'ai pu constater que de tels résultats ne garantissaient pas une génération de modèles numériques de terrain dans la même gamme de fiabilité. Il faut effectivement signaler que ces précisions sont conditionnés par les résultats d'aérotriangulation. Par conséquent, il apparaît nécessaire de ne pas se laisser aveugler par la perspective d'un modèle tridimensionnel de précision infra métrique, déterminé grâce à des points dont l'incertitude est supérieure au mètre.

8.5. Modèles numériques de terrain

8.5.1. Génération des modèles

La génération totalement automatique des modèles numériques par interpolation et corrélation sur une grille régulière a été un échec.

Par conséquent, je me suis attaché à ne produire de modèles que sur la zone extérieure au glissement, la coulée disposant d'un semis de plus de 2000 points topographiques. De ce fait, seuls les premiers et derniers couples de chaque bande ont été utilisés. Aidé par la mesure automatique de points sur la grille d'interpolation, j'ai pu ensuite densifier manuellement le semis de points obtenus. La création des lignes de niveaux a permis de contrôler, en mode stéréoscopique, la cohérence de la restitution.

Cette méthode, basée sur le contrôle visuel de la bonne application des courbes de niveaux sur les pentes du modèle tridimensionnel, permet d'émettre un certain nombre de réserves sur la fiabilité du modèle numérique. En effet, l'ensoleillement a créé de grandes zones d'ombres et a donc rendu impossible la mesure de points dans les fonds de ravines.

De plus, j'ai pu constater que PHOTOMOD recalculait la parallaxe verticale après l'orientation absolue. La valeur obtenue étant supérieure à celle utilisée au cours du protocole de saisie, la position planimétrique s'en est trouvée affectée. Par suite, les courbes de niveaux ont présentées des aberrations inacceptables. Le filtrage de ces points a finalement conduit à une certaine simplification des lignes structurales.

8.5.2. Modèle global

Une fois chaque modèle créé de façon convenable sous PHOTOMOD, les semis de points sont exportés individuellement au format DXF, pour permettre l'importation ultérieure dans un logiciel de DAO et réaliser les jonctions.

Ces opérations ont été réalisées sous MICROSTATION. Les fichiers DXF ont été importés successivement afin d'obtenir le semis global (mnt.dxf et mnt.dgn). Grâce à ce semis, on peut vérifier la cohérence des divers modèles entre eux. Mais ce qui le plus frappant reste l'apparence assez lissée du semis.

En conclusion, les approximations de calcul semblent se retrouver de façon flagrante sur ce semis. Il apparaît donc indispensable qu'une validation soit effectuée, d'une part en ajoutant le semis de points topographiques, et d'autre part, en reprenant le calcul d'aérotriangulation. L'ultime validation serait de reprendre l'ensemble des clichés avec un autre logiciel, pour comparer les résultats.

8.5.3. Estimation de la qualité

D'après les constatations et les remarques précédentes, il est finalement difficile de donner une précision du modèle numérique de terrain. Celle-ci est approximativement métrique dans les zones où des points ont été restitués. Par contre, dans les ravines, les écarts entre le modèle et la réalité du terrain peuvent très certainement atteindre plusieurs dizaines de mètres.

Une telle incertitude sur les modèles numériques de terrain met alors la création d'orthophotographies hors de question, puisque celles-ci s'appuient exclusivement sur les semis de points.

Perspectives et conclusions

9. Perspectives

L'ensemble des remarques formulées dans cette partie sont des suggestions à étudier, des éléments du projet méritant d'être améliorés, dans l'optique d'une suite ou d'une reprise ultérieure. Leur prise en compte devrait être, a priori, un facteur améliorant de la qualité du résultat final, à savoir le MNT et l'orthophotographie.

9.1. Concernant les opérations de terrain

9.1.1. *Implantation et levé des points de calage*

L'implantation à vue des points de calage et leur levé par tachéométrie s'est révélée assez satisfaisante. Il est cependant indéniable que l'emploi du système GPS permettrait d'une part une implantation plus régulière, et d'autre part, le levé pourrait être effectué directement après la pose de la balise.

Il faut tout de même souligner qu'un tel procédé permettrait de gagner du temps sur le terrain, du fait des difficultés d'accès, mais peu de précision, en particulier en altimétrie.

9.1.2. *Le vol photographique*

Concernant le vol, une remarque similaire semble s'imposer : l'emploi d'un système de positionnement suffisamment précis serait un atout considérable, puisqu'il affranchirait de l'incertitude sur les valeurs des données d'orientation externe. De plus, son emploi donnerait des résultats bien meilleurs en matière de recouvrements latéraux.

D'autre part, dans le cadre d'un nouveau vol, la réalisation d'un système de montage de la chambre de prise de vues peut être envisagée. Celui-ci aura pour but de réaliser des photos verticales sans obliger l'avion à voler sur la tranche, et plus ou moins 'en crabe'. En reliant le déclencheur à un minuteur ou à une commande à distance, il est alors possible pour l'opérateur de se consacrer au contrôle de la position sur la ligne de vol. Il faudra cependant tenir compte du nombre de clichés par film du fait de la difficulté de changer une pellicule dans une telle configuration.

La mise en œuvre de tels moyens supposent alors une préparation bien plus fine et soignée, sans pour autant nécessiter un budget excessivement plus important.

9.2. Concernant les travaux photogrammétriques

9.2.1. Le logiciel employé

L'utilisation du logiciel de photogrammétrie numérique PHOTOMOD s'est révélée parfois hasardeuse au cours des tests pour deux raisons. D'une part, la méconnaissance des méthodes de calculs employées est un handicap important lorsqu'il s'agit d'employer cet outil, de façon rationnelle, dans des conditions limites.

D'autre part, la multiplicité des solutions proposées laisse l'utilisateur perplexe quant au choix de la solution optimale pour ses travaux.

Complété par les modules d'aérotriangulation, ce logiciel offre à présent une gamme très complète de calculs photogrammétriques qui mériterait d'être intégralement testée. On pourrait alors établir une échelle de comparaison des différentes méthodes, selon les cas à traiter et les matériels employés.

Il reste cependant à regretter quelques lacunes à l'intérieur de ces modules, comme par exemple l'absence de moyens de calcul des valeurs approchées des points de jonction ou des données d'orientation externe, par transformation linéaire directe (DLT) par exemple.

9.2.2. Protocole et résultats

Le protocole établi semblait à première vue solide et fiable. Cependant, l'échec des calculs du bloc par la méthode d'aérotriangulation par les faisceaux empêche toute véritable validation de celui-ci. Il serait donc intéressant d'envisager une étude, employant ce protocole et les modules d'aérotriangulation, afin de déterminer les limites de validité de chacun d'eux.

9.2.3. Reprise des calculs

Dans l'éventualité d'une reprise des calculs à partir de ces clichés, il pourrait être intéressant de compléter la couverture aérienne par des photographies terrestres afin de lever le doute dans les zones de ravines et les zones non éclairées pendant le vol. Ces divers types de clichés pourraient être ensuite traités avec un logiciel de photogrammétrie numérique multi-images, comme PHOTOMODELER.

10. Conclusions

10.1. Conclusion sur le travail effectué

Le travail que j'ai réalisé pendant ce stage peut être considéré comme un échec partiel. En effet, les modèles numériques de terrain fournis sont de précision inhomogène et quasiment inconnue. De plus, le manque de temps et la qualité des modèles ne m'ont pas permis de tenter la réalisation d'orthophotos.

L'aspect positif de ce travail réside alors beaucoup plus dans les travaux photogrammétriques, puisqu'il a permis l'emploi de nouveaux modules et de les intégrer dans une démarche opérationnelle.

10.2. Conclusion générale

Ce stage a été des plus formateurs puisque l'on m'a confié la réalisation complète d'un projet de grande envergure. De plus, la séquence de tests du logiciel employé a été elle aussi des plus intéressantes, malgré les lacunes des documentations et les quelques difficultés de mise en œuvre. Je regrette cependant de n'avoir pu mener le projet jusqu'à son véritable terme, malgré le temps passé à tenter de résoudre les problèmes.

J'ai pu mettre en pratique une grande majorité des cours enseignés durant les première et deuxième années à l'ENSAIS, que ce soit en photogrammétrie, topographie, calculs topométriques ou programmation. J'ai aussi appris à m'adapter face à des problèmes techniques spécifiques, à leur trouver les solutions les plus rationnelles et efficaces possibles. Ces capacités d'analyse et de flexibilité me semblent finalement être parmi les plus importantes de celles dont doit disposer un ingénieur, et elles ne peuvent être vraiment acquises et mises à l'épreuve que dans la pratique.

D'autre part, j'ai pu découvrir le domaine de la recherche par l'intermédiaire des différentes personnes que j'ai rencontrées et avec qui j'ai été amené à travailler. Ces divers contacts m'ont vivement encouragé et conforté dans mon souhait de poursuivre dans l'étude de la Terre, des différents systèmes qu'elle comporte au moyen des techniques et méthodes que j'ai appris à découvrir.

Références bibliographiques

Ouvrages :

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS), 1980, *Manual of Photogrammetry – (4th edition)*

GONZALEZ R.C. et WOODS R.E., 1993, *Digital Image Processing*

KRAUS K. et WALDHÄUSEL P., 1998, *Manuel de Photogrammétrie – Principes et procédés fondamentaux – Volume I*, ISBN 2-86601-656-4, Editions Hermès, pp. 407

KRAUS K. et WALDHÄUSEL P., 1997, *Photogrammetry – Advanced Methods and Applications – Volume II*

WARNER WS. *et al.*, 1996, *Small Format Aerial Photography*

Parutions et articles :

CEREG – ULP, 1999, *Appel d'offre PNRN 1999*

GEOMETRE, N°5, mai 1999, *Le redressement des images numériques*, pp. 38 à 51

Travaux de recherche, rapports, cours :

CANADIAN CENTRE OF REMOTE SENSING (CCRS), 1998, *Cours Tutoriel de Télédétection*

GALISSON L., 1997, *Auscultation topométrique du glissement de terrain de Barcelonnette par tachéométrie et GPS*, Rapport de stage ENSAIS

GREGOIRE HIMMLER C., 1999, *Hydrologie de surface*, Cours ENGEES

GROSS Q., 1998, *Photogrammétrie aérienne de petit format (essai pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain)*, Rapport de stage ENSAIS

GRUBER M., 1998, *Réseaux topométriques et compensation*, Cours ENSAIS

GRUSSENMEYER P., 1998, *Photogrammétrie*, Cours ENSAIS

KOEHL M., 1999, *Informatique générale - Programmation*, Cours ENSAIS

MALET J.P. et GENET J., 1997, *Détermination de la structure tridimensionnelle du glissement de terrain de Super Sauze par une investigation géotechnique*, Mémoire de maîtrise de Géographie Physique ULP-UFR de Géographie

NEWTECH (New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe), 1997, *Progress Report*

Autres supports :

CONTINENTAL HIGHTECH SERVICE, *Photomod – Manuel de l'utilisateur*, 1998

ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS IV, 1998

<http://www.kodak.com>

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>

<http://www.sertit.u-strasbg.fr>

Table des illustrations

Figures :

(fig. 1.1) Mécanique d'un glissement.....	7
(fig. 2.1) Les Alpes de Haute Provence.....	8
(fig. 2.2) Localisation géographique du site (image SERTIT).....	8
(fig. 3.1) Principe de la vision binoculaire, plan d'observation horizontal (Kraus, 1998).....	13
(fig. 3.2) Parallaxe horizontale sur un couple de clichés.....	14
(fig. 3.3) Méthode du plus proche voisin (CCRS).....	16
(fig. 3.4) Interpolation bilinéaire (CCRS).....	17
(fig. 3.5) Convolution cubique (CCRS).....	17
(fig. 3.6) Modélisation d'une chambre de prise de vues (Kraus, 1998).....	21
(fig. 4.1) Projection centrale et différences d'altitude sur le format (Vue de dessus).....	25
(fig. 4.2) Marques repères de la chambre RICOH.....	26
(fig. 4.3) Réseau de calibration.....	27
(fig. 4.4) Plan de vol, sur fond de carte IGN, sans échelle.....	28
(fig. 6.1) Schéma du réseau d'appui.....	31
(fig. 6.2) Position des clichés sur la direction de vol.....	33

Graphiques :

Graphique 1.....	27
------------------	----

Tableaux :

Tableau 1.....	24
Tableau 2.....	24
Tableau 3.....	24

ANNEXE 1

Saisie et calcul d'aérotriangulation sous PHOTOMOD

Rapport de Stage

UFR de Géographie - CEREG
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Table des matières

1- Préparation d'un couple :	3
Création d'une base de données .pdb pour chaque couple	3
Réalisation de l'orientation interne pour chaque cliché	3
Orientation relative du couple (ORIENTATION)	4
2- Saisie de l'aérotriangulation	5
Spécifications du système de coordonnées terrain	5
Saisie des points de calage et de jonction	5
Transfert sur le couple suivant	5
Traitements du couple suivant	5
Calcul des images transformées	6
Saisie de points complémentaires	6
3- Programme aero.exe	6
Présentation	6
Fonctionnement	6
4- Calcul de l'aérotriangulation	7
Le programme aphoblo.exe	7
Le module blophot.exe	7
5- Guide de mise en œuvre	7
Le premier couple	8
Le couple suivant	8
6- Contrôle de l'aérotriangulation	9
Documentation CHS-Carto Module BLOPHOT	10
Documentation CHS-Carto Module AEROT1	14

1- Préparation d'un couple :

Création d'une base de données .pdb pour chaque couple

Le logiciel travaille avec un fichier base de données dans lequel sont rassemblées toutes les informations concernant le couple, considéré alors comme un objet à part entière. On y trouve entre autres le chemin d'accès aux images, les résultats d'orientation interne, relative, les paramètres de transformation des images pour la création du stéréomodèle observable en anaglyphes...

Une telle base de données peut donc contenir plusieurs objets. Cette propriété ne sera cependant pas exploitée dans un calcul d'aérotriangulation.

Pour créer une base de données, il suffit de sélectionner dans FILE l'option :
OPEN/CREATE DATA BASE

Lors de la création, il faudra veiller à bien laisser l'extension .pdb, qui n'est pas ajoutée par défaut. On peut alors ajouter un objet à la base de données, et saisir les chemins d'accès respectifs vers le cliché de gauche et le cliché de droite.

L'entrée d'un facteur de ré-échantillonnage ne se justifie que lors de l'emploi d'images de grande taille. Son intérêt est d'accélérer les opérations d'affichage ou de régénération des images.

Réalisation de l'orientation interne pour chaque cliché

En lançant la section d'orientation interne du module d'orientation, le logiciel demande le taux d'échantillonnage des clichés, ce qui correspond à la résolution de scannage. Les valeurs par défaut affichées dans les boîtes de dialogue correspondent aux valeurs lues dans les en-têtes des fichiers BITMAP, si elles existent. Si les valeurs réelles sont connues, il est impératif de les saisir. Par contre, dans le cas contraire, il faudra introduire la valeur de la distance principale (FOCAL LENGTH) en pixels. La formule de transformation est la suivante :

$$F_{pix} = F_{mm} \frac{N_x}{L_{mm}}$$

où N est le nombre de pixels dans la direction X, L la longueur du cliché dans cette même direction.

A l'issue de l'orientation relative, la distance principale sera alors ajustée.

Dans le cas où ce taux d'échantillonnage est connu, on peut alors entrer la distance principale en mm ou en pixels. De plus, la connaissance des coordonnées de la projection du point principal n'est pas nécessaire, sachant que PHOTOMOD travaille dans un système ayant pour origine le coin inférieur gauche du cliché, l'axe des X étant orienté vers la droite et les Y vers le haut. Toutes les mesures sont faites en pixels, puis recalculées en mm, grâce aux valeurs de taux d'échantillonnage.

L'orientation interne se fait par saisie des repères de fonds de chambre dans l'une des deux configurations proposées : repères dans les coins, ou au lieu des cotés du cliché. Il faudra veiller à bien saisir les points dans l'ordre.

Lorsque la chambre de prise de vues a été calibrée, on peut entrer les valeurs de corrections des distorsions radiales en fonction de la distance radiale. Si ce fichier de correction a déjà été créé, on peut alors éviter une saisie longue en incorporant directement le chemin d'accès au fichier dans la base de données :

Distortion = [disk]:\ [path1] \ [path2] ... \ [file].dst

Pour finaliser l'orientation interne, on peut imposer les distances entre les repères de fonds de chambre. PHOTOMOD va alors calculer le rapport d'échelle. On va remettre ainsi le système de coordonnées saisis à l'échelle. Ceci est particulièrement intéressant lorsque le taux d'échantillonnage est mal connu. Il est très important d'avoir saisi les mêmes repères sur chacune des photos, les coefficients d'échelle étant calculés pour le couple, à partir d'une seule valeur pour chacune des directions.

Orientation relative du couple (ORIENTATION)

Saisir trois points manuellement :

POINTS => ADD => MANUALLY ou WITH CORRELATION

L'algorithme de corrélation d'image est basée sur la comparaison des intensités lumineuses ou radiométries des zones avoisinant le pointé. La zone est définie par une matrice dite de corrélation (fenêtre). Elle fait intervenir les valeurs de niveaux de gris des pixels pointés et la valeur moyenne des niveaux de gris sur chaque image. Cet algorithme présente deux intérêts : tout d'abord, la valeur du coefficient de corrélation se trouve dans l'ensemble (-1,1). Il est par conséquent possible de définir un seuil de corrélation minimum. D'autre part, les différences de luminosité et de contraste entre cliché de gauche et cliché de droite est compensée¹.

Lorsque trois points on été saisis, l'option AUTOMATICALLY du menu ADD POINTS est alors disponible.

Lancer la recherche automatique de points homologues par corrélation :

POINTS => ADD => AUTOMATICALLY

et répéter plusieurs fois soit en gardant le même seuil minimum de corrélation, soit en le baissant, et en modifiant la taille de la matrice de recherche.

Une fois que l'on a environ 200 points pour l'orientation (vérifier par ORIENTATION => STATUS), on peut alors lancer le calcul de l'orientation relative :

ORIENTATION => RELATIVE ORIENTATION

en utilisant la modélisation normale (NORMAL FITTING).

Le calcul s'effectue et le programme affiche une fenêtre de résultats dans laquelle on trouve les informations suivantes :

- message : solution trouvée ou non
- nombre de points utilisés pour le calcul
- nombre de points mauvais
- parallaxe verticale résiduelle maximale

Il faudra réitérer le calcul, en supprimant les points mauvais (POINTS => DELETE BAD POINTS), jusqu'à ce que la parallaxe résiduelle soit de l'ordre de 0,1 à 0,15 pixels. Le nombre de points utilisés devra cependant être de l'ordre d'une centaine au moins pour que le résultat soit acceptable.

Les autres transformations proposées par PHOTOMOD ne sont pas adaptées au cas de l'aérotriangulation, ou à la photographie aérienne plus généralement. Le manuel d'utilisation donne les aspects généraux de ces différentes méthodes, mais certaines peuvent s'avérer dangereuses quant à leur utilisation sur des clichés semi-métriques ou métriques, obtenus avec des optiques aux comportements bien connus.

¹ PHOTOMOD 1.52, Manuel d'utilisation, pp152, CHS 1999

2- Saisie de l'aérotriangulation

Spécifications du système de coordonnées terrain

La saisie de l'aérotriangulation se fait dans la section REFERENCE DATA du module d'orientation. Il faut d'abord commencer par spécifier les caractéristiques du système de référence terrain :

- ORIENTATION : LEFT HANDED ou RIGHT HANDED, c'est à dire référentiel indirect ou direct.
- SYSTEM : CARTESIAN ou MAP PROJECTION, sachant que la seconde option est adaptée pour la saisie de points de calage déterminés par méthode géodésique.
- UNITS : KILOMETER ou METER, unité dans laquelle seront donnés les écarts maximaux et les erreurs moyennes quadratiques.

Saisie des points de calage et de jonction

Puis, on peut saisir les points en sélectionnant REFERENCE POINTS. Cette opération doit être effectuée en mode stéréo, avec les anaglyphes. Ceci permet d'obtenir les coordonnées image des points sur chacune des photos du couple, et explique la nécessité de la réalisation préalable de l'orientation relative du couple.

Le début de cette saisie s'apparente à une orientation absolue. Cependant, on ne calcule pas l'orientation absolue avant d'avoir lancé l'aérotriangulation.

On pointe chaque point connu dans le système de coordonnées terrain. Du fait que ces points vont intervenir sur plusieurs clichés, l'introduction systématique de ses coordonnées serait une étape particulièrement fastidieuse, on se contente donc de saisir le numéro de point et de reporter ce même numéro en valeur X. Ceci permet de différencier les points, puisque PHOTOMOD ne permet pas de saisir des points différents avec des coordonnées terrain effectives. La validation de la saisie se fait en appuyant sur le bouton NEW.

Pour les points nouveaux à déterminer par le calcul d'aérotriangulation, l'opération de pointé est la même. On affecte de même un jeu de coordonnées fictives, ce qui est ici pleinement justifié.

Le seul élément utile pour les points de calage et les points de jonction est le jeu de coordonnées image sur chaque cliché.

Transfert sur le couple suivant

Lorsque tous les points nécessaires au calcul d'aérotriangulation sont saisis, on peut donc passer à cette même saisie pour le couple suivant. Afin de rendre plus rapide cette saisie, il est utile de lancer le programme aero.exe, qui va faire passer, entre autres, les coordonnées image mesurées sur le cliché de droite du premier couple, en coordonnées image sur le cliché de gauche du second couple, ces deux clichés étant bien évidemment les mêmes.

Avant de lancer ce programme, il est important d'avoir uniquement créé la base de données référençant le second couple. Toute autre opération est à exclure (ne lancer aucun module d'orientation).

Traitements du couple suivant

Une fois que le programme a complété la base de données du second couple, il ne reste alors plus qu'à réaliser les opérations suivantes :

- Orientation interne du cliché de droite
- Orientation relative du couple
- Saisie des points de référence supplémentaires

A la fin de l'étape d'orientation relative, PHOTOMOD va rechercher les homologues des points de calage transférés, sur le cliché de droite. Il fournira ensuite le nombre de points corrélés à droite par rapport au nombre de points existants à gauche. Après validation, le module d'orientation absolue va être automatiquement chargé. Il faut alors annuler le calcul.

Calcul des images transformées

Le logiciel va alors signaler qu'aucune transformation n'a été opérée pour créer un modèle spatial et qu'il va continuer à travailler en unités modèle, le pixel. C'est à ce moment que se fait véritablement le calcul utilisant les résultats de l'orientation relative : PHOTOMOD va calculer les images transformées. Les angles issus du calcul sont employés pour obtenir les images normales ou épipolaires.

Pour cela, il faut ré-échantillonner les images par une transformation bilinéaire (BILINEAR RESAMPLING). C'est la méthode la plus rapide et la plus précise pour effectuer des mesures par la suite.

Au final, chaque image sera rognée des zones n'entrant pas dans la surface de recouvrement, et la visualisation stéréoscopique sera possible.

Saisie de points complémentaires

En repassant, dans le module REFERENCE DATA, on va pouvoir d'une part éliminer les points saisis sur le couple précédent et étant hors du stéréomodèle actuel, pour lesquels PHOTOMOD va envoyer un message d'erreur. Il suffit alors simplement d'effacer ce point de la base de données courante par DELETE.

D'autre part, on pourra saisir les points de calage et de jonction propres à ce couple, tout en vérifiant que les points corrélés sont corrects.

3- Programme aero.exe

Présentation

Le programme aero.exe a été écrit en Visual Basic, ce qui lui permet de présenter une interface en boîte de dialogues, courantes sous Windows 9x. Il utilise les fonctions de base de manipulations de chaînes de caractères, de conversion de données, et les instructions d'entrée/sortie sur les fichiers.

Il faut tout d'abord saisir le chemin du fichier d'entrée, c'est à dire le chemin de la base de données référençant le premier couple, en sélectionnant le bouton PARCOURIR. La même opération est à répéter pour le fichier de sortie, référençant le second couple.

Enfin, il faut saisir le chemin du fichier de correction des distorsions radiales, s'il existe.

La validation de la saisie lance alors le programme de transfert.

Fonctionnement

La première opération est une vérification du fichier de sortie. En effet, si ce dernier comporte déjà des mesures de coordonnées image de points de référence c'est que, dans notre configuration de travail, le programme a déjà été exécuté une fois. Une nouvelle exécution rendrait alors la base de données illisible par PHOTOMOD, et ultérieurement, par les modules d'aérotriangulation.

Puis, pour chaque point de référence (REFPOINT), le programme va extraire de la ligne du fichier d'entrée correspondante le jeu de coordonnées mesurées sur l'image droite, le jeu de coordonnées terrain (fictives ou non) et le numéro de point.

Dans le fichier de sortie, il va alors recréer une ligne de point de référence en écrivant le jeu de coordonnées image pour le cliché de gauche. Le jeu de coordonnées image approchées pour le cliché de droite est alors calculé puis incorporé à la suite. Pour terminer la ligne, le programme va écrire les coordonnées terrain et le numéro du point.

Constitution d'une ligne 'RefPoint' dans la base de données

$$\text{RefPoint00}=(xg,yg)[xd,yd,corr]-(X,Y,Z)(n^\circ \text{ de point, })$$

Exemple de ligne de point de référence dans la base de données :

$$\text{RefPoint02}=(3690.685,3102.301)[2364.989,3167.142,0.0000]-(881682.487,166161.056,166.705)(3002,)$$

Exemple de ligne de point nouveau dans la base de données :

$$\text{RefPoint05}=(3133.118,2746.636)[1874.638,2672.939,0.0000]-(2,0,0)(2,)$$

4- Calcul de l'aérottriangulation

Lorsque la saisie est terminée, il s'agit de créer un fichier qui va répertorier les chemins d'accès à toutes les bases de données référençant les couples à utiliser pour le calcul de l'aérottriangulation.

Pour des raisons de sûreté, il est fortement conseillé de conserver la sauvegarde des fichiers pdb avant toute exécution des modules d'aérottriangulation.

Le programme aphoblo.exe

Ce programme permet la création du fichier de référencement aphoblo.ae1. Le but de ce fichier est de spécifier au premier programme d'aérottriangulation les chemins d'accès aux répertoires de travail et de sauvegarde des fichiers de base de données.

Ce programme, écrit lui aussi en Visual Basic, requiert le chemin d'accès à un répertoire contenant l'ensemble des fichiers pdb à traiter. Il va alors créer deux copies de l'ensemble des fichiers. On aura par conséquent deux sauvegardes du jeu de fichiers.

En fin de traitement, le programme donnera le chemin d'accès au fichier créé.

Le module blophot.exe

Avec le fichier aphoblo.ae1 créé, on peut lancer le premier module d'aérottriangulation de PHOTOMOD. Le module BLOPHOT a pour unique vocation de créer les fichiers nécessaires à la compensation par les faisceaux, à savoir un fichier bundle.aer, qui contient pour chaque image, les mesures pixel des points de calage et de jonction.

5- Guide de mise en œuvre

C'est en fait un résumé de l'ensemble des informations présentées ci-dessus. Il est cependant beaucoup plus orienté vers la mise en pratique des diverses recommandations, et pourrait ainsi être également appelé mode 'opérateur pour la mise en œuvre d'une aérottriangulation'.

Le premier couple

C'est une des étapes décisives du calcul d'aérotriangulation. C'est dans la base de données qui le référence que seront stockées les informations qui seront transmises par la suite grâce au programme `aero.exe`.

Il faut alors réaliser les étapes suivantes :

- Création de la base de données (*.pdb)
- Orientation interne des deux clichés
 - Spécification du taux d'échantillonnage
 - Saisie des repères de fonds de chambre
 - Introduction des distances de contrôle pour calculs des mises à l'échelle
 - Saisie des corrections de distorsion, pour création du fichier correspondant
- Orientation relative du couple
 - Saisie de trois points en manuel ou avec corrélation (recommandé)
 - Saisie automatique de points
 - Calcul de l'orientation relative : parallaxe verticale résiduelle inférieure à 0,15 pixels pour une centaine de points homologues
 - Calcul des images transformées : ré-échantillonnage bilinéaire
- Saisie des points pour l'aérotriangulation
 - Affichage en mode stéréo
 - Points de calage avec numéro et X fictif
 - Points de jonction avec numéro et X fictif

Le couple suivant

Une fois que le premier couple est intégralement réalisé, on passe au couple suivant. Les étapes suivantes sont alors à réaliser :

- Création de la base de données (*.pdb)
- Fermeture de cette même base
- Lancement du programme de transfert `aero.exe`
 - Saisie du chemin de la base de données du couple précédent
 - Saisie du chemin de la base qui vient d'être créée
 - Saisie du chemin du fichier de corrections de distorsions
- Réouverture de la base et orientation interne
 - Orientation du cliché de droite
 - Introduction des distances de contrôle pour calculs des mises à l'échelle
- Orientation relative
 - Saisie de trois points en manuel ou avec corrélation (recommandé)
 - Saisie automatique de points
 - Calcul de l'orientation relative : parallaxe verticale résiduelle inférieure à 0,15 pixels pour une centaine de points homologues
 - Marquage des homologues des points de référence, avec un coefficient de corrélation minimal de 0,95
 - **Annulation** du calcul de l'orientation absolue
 - Calcul des images transformées : ré-échantillonnage bilinéaire
 - Sauvegarde des changements des données de référence
- Saisie des points pour l'aérotriangulation
 - Suppression des points hors modèle
 - Ajout des points de calage et de jonction

Lorsque ce couple est terminé, c'est cette partie du protocole opératoire qu'il faut reprendre. Le processus de saisie se fait donc de proche en proche. Pour cette raison, il faut essayer de limiter la parallaxe verticale résiduelle, qui comme toute erreur accidentelle est sujette à une composition quadratique, le risque étant d'obtenir de gros écarts en bout de modèle.

6- Contrôle de l'aérotriangulation

Les fichiers générés au cours du calcul permettent un bon suivi de la qualité des résultats. Les contenus de ces fichiers sont très détaillés dans les documentations des modules, présentées dans les pages suivantes, mais on peut tout de même citer les éléments majeurs :

- *iter.txt* : fichiers présentant pour chaque itération de calcul les corrections apportées aux coordonnées terrain de tous les points, ainsi que l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids.
- *pointes.txt* : donne pour tout point les écarts sur x et y, en coordonnées image, à partir des définitions finales des points terrain et des centres de perspectives.
- *ptesctl.txt* : donne les rayons d'erreur des pointés cliché de chaque point sur chaque photo. Très utile pour la détection de faute de saisie.
- *points.txt* : donne pour sur les coordonnées de chaque point les écarts par rapport aux valeurs approchées, les précisions de détermination
- *camera.txt* : donne les coordonnées et les rotations en chaque centre de perspective, avec leurs précisions ou écarts respectifs.

La dernière étape de validation de l'aérotriangulation reste finalement le calcul de l'orientation absolue. En effet, la réussite de ce calcul avec des erreurs moyennes quadratiques correctes doit être considérée comme un signe de la cohérence des données terrain utilisées.

Documentation CHS-Carto Module BLOPHOT

I. Généralités

Le but est d'extraire pour l'aérotriangulation les informations déjà saisies sous PHOTOMOD afin de limiter au maximum les saisies de données en double puis de constituer un fichier de données complet pour l'aérotriangulation, et enfin de renvoyer à Photomod les coordonnées calculées par l'aérotriangulation.

Il sera donc demandé pour préparer l'aérotriangulation d'un bloc de photographies deux séries de données :

La composition du bloc (fichier APHOBLO.AE1 = Annexe A).

Les données nécessaires au calcul d'aérotriangulation et qui sont soit absentes des fichiers PDB, soit dont la saisie dans PHOTOMOD serait redondante et fastidieuse au niveau de chaque couple (APHODAT.AE1 = Annexe B).

Les différentes zones à fournir sont le plus souvent décrites dans la brochure décrivant le logiciel d'aérotriangulation et ne sont pas décrites ici. La notation (E,R,A) concernant le type de données est la même :

E = entier

R = réel

A = alphabétique

Rappel : dans PHOTOMOD, les données sont enregistrées pour chaque couple dans un fichier dont l'extension est .PDB.

Attention : il faut créer 2 directories avant de lancer le processus, l'une contenant les fichiers PDB que l'on veut traiter, l'autre copiant ces mêmes fichiers pour les sauvegarder avant qu'ils ne soient modifiés.

II. Fichier APHOBLO.AE1

Ce fichier fournit la composition du bloc à traiter. Chaque enregistrement donne la composition du couple afférent à un fichier PDB. Ce fichier est zoné et le cadrage est à respecter.

1. Directories

Il existe 2 enregistrements directories qui doivent se terminer par \ (anti-slash)

Enregistrement 1 : directory où se trouvent les fichiers PDB venant des pointages sous Photomod. Ces fichiers PDB seront écrasés par les nouveaux fichiers PDB nés à la suite de l'aérotriangulation et prenant en compte les résultats de celle-ci.

Enregistrement 2 : directory où seront copiés les fichiers PDB d'origine. Elle est obligatoirement différente de la précédente.

NB : dans cette directory sera créé un fichier PDB.OLD indiquant que le transfert des anciens PDB a déjà été fait lors d'un passage précédent du programme d'aérotriangulation. Le détruire expose à une mise à jour multiple des PDB d'origine : les résultats seront alors imprévisibles.

Destruction du fichier PDB.OLD :

On est certain de ne plus avoir à repasser l'aérotriangulation sur le bloc. Adjonction de nouveaux couples à un bloc déjà traité. Procéder alors comme suit :

- détruire les fichiers PDB de la directory mise à jour (ligne 1 de APHOBLO.DAT = dir 1)
- adjoindre les nouveaux fichiers PDB dans la directory des PDB d'origine (ligne 2 de APHOBLO.DAT = dir 2)
- détruire PDB.OLD dans cette dernière directory (dir 2)
- copier tous les fichiers de dir 2 dans dir 1
- détruire tous les fichiers de dir 2

Vous pouvez alors relancer le programme après avoir mis à jour les fichiers APHOBLO.AE1 et APHODAT.AE1 avec les éléments des nouveaux couples à traiter.

2. Composition du bloc

- Zone 1 (E) longueur 8, cadrée à droite = numéro de la photo gauche du couple
- Zone 2 (A) un seul blanc
- Zone 3 (E) longueur 8, cadrée à droite = numéro de la photo droite du couple
- Zone 4 (A) un seul blanc
- Zone 5 (A) longueur 8 = nom du fichier PDB correspondant sans l'extension .PDB.

III. Fichier APHODAT.AE1

Ce fichier est en format "libre" : chaque zone est séparée par une seule virgule ou bien un ou plusieurs blancs.

Type d'un point : alphanumérique (majuscules et minuscules sont considérées comme des caractères différents). 3 types de points sont conventionnels :

- G : points connus en x, y et z
- X : points connus en x et y g, x et z restent à votre disposition
- Z : points connus en z

2 types de points vous sont interdits car nécessaires sur le plan interne :

- U = underwater. Points situés sous l'eau, calculés dans l'aérotriangulation (u est disponible)
- & = fin de certains fichiers

1. Ligne 1

Zone 1 (R) longueur focale en micron, les pointés des fichiers PDB étant convertis en microns.

2. Ligne 2 :

Précisions estimées SX, SY, SZ, SXY, SXZ, SYZ des coordonnées approchées d'un ensemble de points. Toutes les zones sont réelles. Les termes rectangulaires sont le plus souvent nuls car, en général, il n'y a pas corrélation entre une erreur en x et une erreur en y...

3. Ligne 3 à 12 :

Coordonnées de chaque point correspondant aux SX, SY, SZ, SXY, SXZ, SYZ de la ligne 2

Zone 1 (E)	numéro du point
Zone 2 (R)	
Zone 3 (R)	coordonnées terrain approchées X, Y, Z du point
Zone 4 (R)	
Zone 5 (A)	type du point – ici T

Il est possible de mélanger des types de points différents. L'essentiel est que l'ensemble des points aient même SX, SY, SZ, SXY, SXZ, SYZ.

4. Ligne 13 :

Fin de l'ensemble des points précédents

Zone 1 (E) 999999 (6 fois le chiffre 9)

Les zones 2 à 4 (voir III.3) sont non significatives mais doivent être présentes.

Zone 5 (A) : n'importe quel caractère, sauf &, signifie qu'un autre ensemble de points de précision identiques suit cette ligne.

& signifie la fin de tous les ensembles de points : dans ce cas, la ligne suivante donnera les précisions sur les points de visée (voir III.7 et III.8).

5. Ligne 14 :

Précisions de l'ensemble suivant (voir 2)

6. Lignes 15-30 :

Coordonnées de chaque point de l'ensemble (voir 3)

La zone 5 est ici G (ground point)

7. Ligne 31 :

Fin des points (voir 4) (& en zone 5)

NB : le nombre d'ensembles de points possibles n'est limité que par les caractères ASCII (chiffres, majuscules, minuscules, caractères spéciaux). Le dernier ensemble aura & dans la zone 5 de sa ligne finale.

8. Ligne 32 :

Précision estimée des coordonnées des points de visée en oméga, phi, kappa, x, y, z. Il est rappelé que les précisions des angles sont en secondes d'arc.

9. Ligne 33-36 :

Coordonnées des points de visée

Zone 1 (E)	numéro de photo
Zone 2 (R)	
Zone 3 (R)	angles oméga, phi, kappa en degrés centésimaux.
Zone 4 (R)	Pour la détermination de kappa voir aérotriangulation.
Zone 5	Valeur approchée de X

Zone 6	Valeur approchée de Y
Zone 7	Valeur approchée de Z

IV. Mise en place. Exécution

1. Exécution

Créer les directories devant contenir les pdb (en cours et sauvetage).

Copier vos fichiers pdb dans la directory des pdb en cours.

Créer les fichiers APHODAT.AE1, APHOBLO.AE1 dans la même directory qui contiendra à la fin de la procédure les différents fichiers résultats autres que les fichiers pdb.

Double-click sur l'icône de blophot.exe.

Click sur file : positionnez-vous sur la directory où sont les fichiers AE1.

Ouvrir un des deux fichiers AE1.

Click sur start – à noter, l'option debug n'est à utiliser qu'en cas de gros problème : les fichiers intermédiaires de la procédure sont conservés et, le cas échéant, seront à envoyer à CHS pour analyse.

3. Erreurs

Deux fichiers contiennent les erreurs détectées.

Avant aérottriangulation, fichier BLOERR.TXT. Deux cas :

- un point terrain ayant plus d'un jeu de coordonnées X, Y, Z
- un point terrain ayant moins de deux pointés photo

Le fichier BUNDLE.AER créé sera alors inconsistant.

Après aérottriangulation, fichier ERROR.TXT où les libellés sont explicites. De plus, en zone commentaire des points (apparaissant donc dans Photomod), apparaissent les messages d'erreurs suivants :

- MONO : le point est monoscopique dans ce fichier PDB et n'a pas été utilisé dans l'aérottriangulation. Par contre, il a été trouvé dans d'autres PDB et est mis à jour correctement.
- NOT FOUND : le point n'a pas été pris en compte dans le calcul d'aérottriangulation (cas par exemple d'une suppression manuelle dans le fichier BUNDLE.AER). Il n'est donc pas mis à jour.
- MONO & NOT FOUND : les deux cas précédents cumulés.

Les trois boutons (– □ ×) en haut à droite de la fenêtre sont inactifs. N'utiliser que la barre de menu.

Documentation CHS-Carto Module AEROT1

Le logiciel AEROT 1 est un logiciel de photogrammétrie destiné à effectuer des calculs d'aérotriangulation ainsi que de bathymétrie photogrammétrique.

L'aérotriangulation par faisceaux est dérivée de la méthode préconisée par l'American Society of Photogrammetry dans "Manual of Photogrammetry – Fourth Edition – 1980", avec une adaptation CHS et la bathymétrie photogrammétrique est l'œuvre originale du Dr Massoud Wheda pour sa thèse de Ph. D à l'University of Wisconsin, Madison en 1984.

Développé sous Unix, ce logiciel a été transcrit en Fortran Lahey 95 sous Windows 3.xx et sous Windows 95.

Ce programme peut être utilisé directement ou en liaison avec le logiciel de photogrammétrie numérique PHOTOMOD.

I. Généralités

La méthode d'aérotriangulation retenue est la compensation en bloc par faisceaux qui présente l'avantage d'accepter des informations complémentaires provenant de mesures indépendantes de la prise de vue ainsi que les positions des centres de perspectives de chaque cliché, pour réduire significativement le nombre de points d'appui nécessaire à la compensation du bloc de clichés.

Elle repose sur la modélisation de la prise de vue, cliché par cliché, à l'aide de points d'appui connus en coordonnées x, y sur les clichés ainsi qu'en coordonnées terrain XYZ, pour calculer les coordonnées terrain des points nouveaux qui ne disposent que de coordonnées cliché ; la modélisation s'obtient par ajustement global par moindres carrés de l'ensemble des informations disponibles, chacune étant pondérée par l'intervalle de variation qui lui est alloué par l'opérateur quand le calcul cherche à imposer le principe de collinéarité en alignant centre de perspective, point photo et point terrain.

Cet intervalle de variation est estimé par la précision avec laquelle sont connues les données d'entrée, catégorie par catégorie.

II. Données en entrées. Fichier BUNDLE.AER

Si l'on utilise le programme de liaison Photomod-Aérotriangulation, le fichier BUNDLE.AER est généré automatiquement.

Unités :

1. Longueur focale et coordonnées clichés d'un point ainsi que les précisions associées doivent être dans la même unité (pixel, micron,...). Cependant toutes les sorties ont été dimensionnées pour le micron et ne pas utiliser cette unité vous expose à un manque de précision ou à un dépassement de capacité.
L'utilisation des corrections des distorsions radiales d'objectifs impose le micron.
2. Coordonnées terrain et leurs précisions doivent être dans la même unité (mètres, pieds,...). Pour la même raison que ci-dessus, le mètre est recommandé.
3. Angles (ω, ϕ, κ) sont en degrés centésimaux, leurs précisions en secondes d'arc.
4. Dans une ligne, chaque zone sera séparée par : 1 seule virgule ou 1 ou plusieurs blancs

5. Chaque zone possède un type à respecter :
- Réel (R) chiffres avec un point décimal (1. ou 0. ou .0)
 - Entier (E) chiffres sans un point décimal (1 ou 0 ou 1515)
 - Alphabétique (A) lettres ou chiffres ou caractères spéciaux
6. Types de points :
- G : points d'appui connus en X, Y, Z
 - X : points connus en X, Y
 - Z : points connus en Z

Pour des besoins internes, U (underwater) et & (voir plus bas) sont réservés.
Tous les autres caractères ASCII sauf le blanc sont à votre disposition.

Important : les points situés sous l'eau ne devront jamais avoir de coordonnées terrestres.

1. Données générales (lignes 1 à 5. Annexe A)

1.1. Ligne 1 Zones entières

- Trois premières zones toujours 1
- Zone 4 : 0 il n'existe pas de points sous l'eau voir ci-dessous
1 il existe des points sous l'eau
- Zone 5 : existence de points ayant des coordonnées terrestres connues avec la même précision
0 pas de point de ce type
1 il existe des points de ce type

1.2. Ligne 2

- Zone 1 (E) : nombre de clichés à traiter
- Zone 2 (R) : longueur focale

1.3. Ligne 3 : éléments de calcul des points sous l'eau

Cette ligne doit être présente même s'il n'y a aucun point dans ce cas.

- Zone 1 (R) : longueur d'onde de la houle (distance de crête à crête)
- Zone 2 (R) : amplitude de la houle
- Zone 3 (R) : azimut de la direction de la houle
- Zone 4 (R) : indice de réfraction de l'eau

NB : si l'amplitude de la houle est nulle, le plan d'eau est considéré comme non agité (lagune, lac,...).

1.4. Ligne 4

- Zone 1 (E) : nombre maximum d'itérations permises. 10 est recommandé
- Zone 2 (R) précision sur les coordonnées terrain X, Y, Z des points
- Zone 3 (R) nouveaux désirées en sortie
- Zone 4 (R) .001 est recommandé si l'unité est en mètre

Cette précision s'entend comme étant la différence maximale autorisée entre les résultats de deux itérations finales.

1.5. Ligne 5

- Zone 1 (R) précision en x et y des coordonnées cliché d'un point
- Zone 2 (R)

- Zone 3 (R) précision en xy des coordonnées cliché d'un point

Remarques :

- a) La zone 3 est en principe toujours nulle : cela implique qu'une imprécision sur les pointés photo en x n'entraîne aucune erreur sur le pointé en y et réciproquement.
- b) Ces éléments sont communs à tous les pointés cliché car il est considéré que les mesures sont faites avec le même appareil ou le même logiciel et le même opérateur.

2. Pointés cliché (lignes 6 à 114. Annexe A)

Chaque cliché devra respecter le schéma du premier cliché (lignes 6 à 43) décrit ci-dessus.

2.1. Ligne 6 (E) : indicateur de présence de points sous l'eau

- | | |
|---|---|
| 0 | pas de points sous l'eau pour cette photo |
| 1 | points sous l'eau pour cette photo |

2.2. Ligne 7-16 : coordonnées cliché des points terrain

- Zone 1 (E) : identification du point
- Zone 2 (E) : identification de la photo

- Zone 3 (R) : coordonnées xy du point dans la photo.
- Zone 4 (R) : Il est recommandé de situer l'origine des coordonnées au point principal optique

2.3. Ligne 17 : fin des coordonnées cliché d'une photo

Même description qu'au II.2.2. La zone 1 est obligatoirement 999999 (6 fois le chiffre 9). Les autres zones ne sont pas significatives mais doivent être présentes.

2.4. Lignes 18 à 43 : coordonnées cliché des points sous l'eau

Ces lignes ne sont obligatoires que si la photo possède des points sous l'eau (indicatif à 1 : voir II.2.1).

Les lignes 18 à 42 sont semblables aux lignes 7 à 16 (voir II.2.2). La ligne 43 est semblable à la ligne 17 (voir II.2.3).

3. Coordonnées terrain. Précisions communes (Annexe B)

Ces lignes se situeraient entre les lignes 114 et 115 de l'annexe A qui dans l'exemple fourni n'en comprend pas. Un autre exemple est donné en B. Elles correspondent en général aux points nouveaux que l'on situe très approximativement sur une carte même ancienne. La précision est commune car la méthode d'approximation est la même pour tous ces points.

Plusieurs ensembles de points sont possibles.

Chaque ensemble est précédé des précisions concernant tous les points qui suivent.

Exemple : - points connus en x, y avec précision et un z douteux
 - points connus en z, mais avec x, y douteux

3.1. Ligne 1 : précisions

- Zone 1 (R)
- Zone 2 (R) : précisions en X, Y, Z

- Zone 3 (R)
- Zone 4 (R)
- Zone 5 (R) : précisions en XY, XZ, YZ. Presque toujours nuls (voir 2.5)
- Zone 6 (R) : id.

3.2. Lignes 2-12 : coordonnées terrestres du point

- Zone 1 (I) : identification du point
- Zone 2 (A) : type du point
- Zone 3 (R)
- Zone 4 (R) coordonnées XYZ du point terrain (nouveau ou appui)
- Zone 5 (R)

3.3. Ligne 13 : fin des points

- Zone 1 (I) 999999 (6 fois le chiffre 9).

Les autres zones ne sont pas significatives mais doivent être présentes.

- Zone 2 (A) mettre & si l'ensemble de points est le dernier sinon la valeur est non significative mais doit être présente

4. Coordonnées terrain. Précisions individualisées (Annexe A : lignes 115, 126)

Ces lignes correspondent en général aux points d'appui (ground control points) que l'on connaît avec précision et pouvant provenir de sources différentes (GPS, points géodésiques, cartes à grande échelle, ...).

4.1. Lignes 115 à 125 : coordonnées terrain et précisions

- Zone 1 (E) : identification du point
- Zone 2 (A) : type du point (voir 3.2)
- Zone 3 (R) : coordonnées X du point et sa précision
- Zone 4 (R)
- Zone 5 (R) idem Y
- Zone 6 (R)
- Zone 7 (R) idem Z
- Zone 8 (R)
- Zone 9 (R)
- Zone 10 (R) : précisions en XY, XZ et YZ. Presque toujours nuls (voir 2.5)
- Zone 11 (R)

4.2. Ligne 126 : fin des coordonnées terrain

- Zone 1 (I) 999999 (6 fois le chiffre 9).

Les autres zones ne sont pas significatives mais doivent être présentes.

Il doit exister au moins un point dans cette catégorie.

5. Paramètres d'orientation des clichés

5.1. Précisions : communes à tous les points de visée

Ligne 127

- Zone 1 (R) : précision sur oméga
- Zone 2 (R) : précision sur phi en secondes d'arc

- Zone 3 (R) : précision sur kappa
- Zone 4 (R)
- Zone 5 (R) : précision sur les coordonnées respectives XYZ
- Zone 6 (R)

5.2. Paramètres d'orientation

- Zone 1 (E) : identification du cliché
- Zone 2 (R) : oméga
- Zone 3 (R) : phi en degrés centésimaux
- Zone 4 (R) : kappa
- Zone 5 (R) : X, Y, Z du point de visée
- Zone 6 (R)
- Zone 7 (R)

Détermination des paramètres de visées s'ils ne sont pas connus :

En photographie aérienne, les photos sont en général quasi verticales donc oméga = phi = 0, leur précision étant alors de quelques degrés.

X, Y devront approximativement correspondre aux coordonnées terrestres du point principal optique, leur précision doit couvrir largement l'approximation ainsi faite.

Z est déterminé à partir de l'échelle des clichés.

Kappa, angle de rotation autour de l'axe OZ pour amener l'axe oy parallèlement à l'axe OY, sera calculé d'après le croquis de l'annexe K.

Kappa sera compté positivement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre si les pointés sont faits en mode négatif, positivement dans le sens des aiguilles d'une montre si les pointés sont faits en mode positif.

$K = + 55$ en mode négatif (dans l'exemple de l'annexe K)

$K = - 55$ en mode positif

III. Fichier RADCOR.AER (Annexe C)

Correction radiales des distorsions comme les distorsions de l'objectif, la réfraction atmosphérique quand la prise de vue est verticale (Annexe C).

Ligne 1

- Zone 1 (E) : 0, pas de corrections
1, corrections

Ligne 2

- Zone 1 (R) : coordonnées X, Y du centre de la photo dans votre système
- Zone 2 (R) : de coordonnées en microns

Attention : il est ici supposé que, pour tout le bloc à traiter, la caméra est restée la même et que le système de coordonnées est homogène pour tout le bloc (même origine et orientation pour chaque image. Exemple : origine au centre, au coin bas gauche, et axes x, y dans le même sens

Ligne 3

- Zone 1 (R) : écarts $\Delta X, \Delta Y$ du PPA en microns
- Zone 2 (R)

Ligne 4 à 18

- Zone 1 (R) : rayon en mm
- Zone 2 (R) : distorsion en microns, valeurs positives quand la distorsion est orientée vers l'extérieur et négatives vers l'intérieur

Les données (lignes 2 à 18) sont issues du certificat de calibration de la caméra.

Le nombre de valeurs pour les distorsions (ici 15) est limité à 40.

La présence de ce fichier est obligatoire. S'il n'y a pas de corrections, il comportera une seule ligne comportant le chiffre 0.

IV. Données en sorties**1. Fichier BLOCKIN.TXT**

Ce fichier est le reflet des entrées (Annexe D).

2. Fichier RESULT.TXT

Ce fichier est normalement vide : il recueille les messages d'erreur en cas de divergence du modèle ou d'élimination de points. A la fin de la procédure, voyez immédiatement si le volume est zéro sinon lister le fichier pour examiner les erreurs.

3. Fichier ITER.TXT (Annexe E). L'écart-type des poids unitaires

Destiné à suivre l'évolution des itérations de calcul : peu utile sauf lorsque le calcul converge mal. L'indication principale est l'évolution de l'écart-type de la matrice des poids unitaires (standard deviation of unit weight) qui doit tendre vers 1.

4. Fichier POINTES.TXT (Annexe F)

Il se décompose en 3 ou 4 parties.

Résidu sur les pointés photo (VX, VY) : Ils doivent être voisins de zéro ou voisins des précisions de pointé fournies. En cas de mauvaise convergence, cette partie de listing est peu utilisable (voir 3).

5. Fichier UNDERW.TXT (Underwater points and their coordinates) (Annexe G)

Le calcul du modèle se fait sans ces points. De mauvais SX, SY, SH peuvent avoir deux causes :

- ils sont très mauvais : la modélisation s'est mal faite, mais tous les autres éléments seront mauvais (résidus sur points, sur coordonnées terrestres...).
- quelques-uns sont mauvais : revoir les pointés photo.

6. Fichier CAMERA.TXT (Annexe H)

Éléments des points de visée (Camera station) : les angles d'orientation et les coordonnées des points de visée

Attention les S.OME S.PHI S.KAP sont en degrés centésimaux.

Les VX, VY, VZ s'entendent : valeur calculée – valeur entrée.

Les VX, VY, VZ peuvent être très grands et même en dépassement de capacité si les points de visée ont été estimés trop grossièrement.

7. Fichier POINTES.TXT (Annexe I)

Coordonnées calculées des points terrains (adjusted ground coordinates and their statistics).

Pour tous les points, liste des :

- numéro de points
- résidus d'itération SX, SY, SZ

Pour tous les points G, X, Z biens connus respectivement en XYZ, XY et Z on donne de plus les VX, VY, VZ (valeur calculée – valeur donnée) qui ont un sens, ainsi que leur moyenne et l'écart-type.

8. Fichier PTESCTL.TXT (Annexe J)

Ce fichier sert lorsque la convergence est mauvaise, y compris le cas de divergence.

8.1. Le calcul diverge

Repasser le programme sans détruire le fichier BLOCCTL.CVG. Si au bout de 3 ou 4 essais, on n'a pas obtenu de convergence, pointer minutieusement les données en entrée : une ou plusieurs d'entre elles sont totalement erronées. Exemple : 2 pointés différents pour un point dans la même photo, inversion de points entre pointés photo et coordonnées terrain, estimation irréaliste de centre de visée ou de l'angle kappa, précisions estimées incohérentes ou trop larges...

8.2. Le calcul converge mais les résultats sont médiocres

Le fichier PTESCTL.TXT (Annexe J) donne les éléments suivants :

- Zone 1 : " rayon d'erreur " du pointé photo $\sqrt{SX^2 + SY^2}$
- Zone 2 : identification du point
- Zone 3 : identification de la photo où a été fait le pointé
- Zone 4 : X et SX
- Zone 5
- Zone 6 : Y et SY
- Zone 7

Le fichier est trié sur le " rayon d'erreur " croissant. Les pointés photo les plus mauvais se trouvent donc en fin. La procédure de correction sera alors la suivante :

- examen des points ayant le plus grand rayon d'erreur : pointés et coordonnées terrain. Il peut y avoir confusion avec un autre point, plusieurs pointés différents du point dans la même photo,...
- correction des coordonnées et/ou des pointés ou même suppression du point (attention supprimer tous les pointés photo et les coordonnées).
- destruction du fichier BLOCCTL.CVG
- repasser le programme.

On recommencera cette procédure jusqu'à obtention de résultats corrects.

8.3. Rôle du fichier BLOCCTL.CVG

En cas de divergence, aucun fichier sortie n'est créé empêchant ainsi toute analyse et toute recherche. Le fichier BLOCCTL.CVG agit sur les précisions des pointés photo de façon à entrer si cela est possible dans le domaine de convergence en enregistrant certains paramètres du passage précédent.

Aussi, devez-vous :

- détruire ce fichier s'il existe quand vous relancez le programme avec des données nouvelles ou corrigées
- le conserver en cas de divergence avant de relancer le programme afin d'obtenir des résultats permettant l'analyse

V. Mise en place. Exécution

1. Mise en place

Pour copier les fichiers de la disquette, utiliser Explorateur Windows.

1.1. Mise en place des exécutable

Copier bloaero.exe dans la directory de votre choix.

Amener l'icône de bloaero.exe sur votre bureau. Vous pouvez changer le nom (Raccourci vers bloaero.exe) en cliquant sur le bouton droit et en choisissant Renommer.

1.2. Mise en place des exemples

Copier le répertoire data de la disquette dans un répertoire de votre choix.

Les données fournies correspondent à un exemple réel.

Vous n'êtes pas obligés de copier cet exemple. Mais l'exécuter vous donnera l'assurance qu'il n'y a pas eu de problèmes dans le transfert des données, notamment de bloaero.exe.

2. Exécution

Créer le fichier BUNDLE.AER dans la directory qui contiendra à la fin de la procédure les différents fichiers résultats.

Double-click sur l'icône de bloaero.exe.

Click sur file : positionnez-vous sur la directory où est le fichier AER.

Ouvrir le fichier AER.

Click sur start – à noter, l'option debug n'est à utiliser qu'en cas de gros problème : les fichiers intermédiaires de la procédure sont conservés et, le cas échéant, seront à envoyer à CHS pour analyse.

Les trois boutons (– □ ×) en haut à droite de la fenêtre sont inactifs. N'utiliser que la barre de menu.

Annexes de la documentation
CHS-CARTO

**Contenus des fichiers
employés par les modules
BLOPHOT et AEROT1**

ANNEXE A Fichier BUNDLE.AER

Fourni à titre d'exemple d'application, ce fichier ne saurait être considéré comme normatif, en particulier pour les précisions affichées.

```
1<==== 1ere colonne des donnees
1 1,1,1,1,0
2 3,151554.
3 200000. .0 0. 1.333
4 10,.001,0.001,0.001
5 3.,3.,0.0
6 1
7 103,19,-7320.6,-34118.9
8 112,19,-7175.5,3096.9
9 123,19,5010.7,89908.3
10 102,19,21999.9,-25284.8
11 111,19,73896.6,8522.5
12 121,19,98430.3,68388.1
13 101,19,36898.0,-7951.1
14 141,19,-17695.4,92102.8
15 104,19,-20529.9,-41632.0
16 122,19,26898.8,43895.1
17 999999,0,0.,0.
18 23 19 47014.7 -44339.8
19 24 19 54243.6 -47844.1
20 25 19 59027.6 -52242.6
21 26 19 66547.2 -55711.5
22 27 19 77785.5 -59688.5
23 28 19 88260.3 -57254.6
24 29 19 80993.3 -51202.6
25 30 19 86284.7 -44076.0
26 31 19 83650.3 -35099.0
27 32 19 72003.5 -39144.0
28 33 19 65765.8 -38373.4
29 34 19 57495.0 -40715.6
30 35 19 59824.2 -32302.2
31 36 19 67928.9 -28443.7
32 37 19 83296.3 -22125.9
33 38 19 91079.3 -25739.3
34 39 19 102552.9 -24131.2
35 40 19 88638.1 -16817.5
36 41 19 111225.9 48097.3
37 42 19 107947.5 28313.2
38 43 19 101201.4 31713.3
39 44 19 99847.2 24000.4
40 45 19 82623.0 10270.1
41 46 19 75627.1 2621.3
42 47 19 73667.6 -3871.9
43 999999 0 0. 0.
44 1
45 103,20,-97971.4,-37726.8
46 112,20,-99169.9,-759.1
47 123,20,-88994.8,84603.3
48 102,20,-69850.5,-28390.5
```

49 111,20,-18595.0,6295.0
50 121,20,4155.7,65997.5
51 101,20,-54804.6,-10830.7
52 104,20,-110915.1,-45451.6
53 122,20,-66273.1,40213.3
54 999999,0,0.,0.
55 23 20 -43546.8 -47000.3
56 24 20 -36218.7 -50395.3
57 25 20 -31301.0 -54737.0
58 26 20 -23664.4 -58104.3
59 27 20 -12235.1 -61930.5
60 28 20 -1779.0 -59303.2
61 29 20 -9256.3 -53320.3
62 30 20 -4137.0 -46053.2
63 31 20 -7008.5 -37073.9
64 32 20 -18641.0 -41344.4
65 33 20 -24936.5 -40683.4
66 34 20 -33157.4 -43179.7
67 35 20 -31069.8 -34702.3
68 36 20 -23033.7 -30687.9
69 37 20 -7745.5 -24074.5
70 38 20 169.8 -27548.6
71 39 20 11660.1 -25721.7
72 40 20 -2606.7 -18661.2
73 41 20 18038.5 46336.3
74 42 20 15371.3 26681.4
75 43 20 8499.5 29898.7
76 44 20 7407.8 22224.7
77 45 20 -9479.9 8220.7
78 46 20 -16311.1 468.4
79 47 20 -17975.4 -6034.1
80 999999 0 0. 0.
81 1
82 111,30,57780.5,30801.1
83 121,30,8079.5,-9257.7
84 147,30,-3569.2,-90218.2
85 101,30,97357.3,27116.9
86 141,30,98115.6,-85679.9
87 122,30,82205.1,-22581.9
88 999999,0,0.,0.
89 23 30 105277.7 63489.6
90 24 30 100685.3 70046.9
91 25 30 98589.5 76187.9
92 26 30 93717.9 82822.1
93 27 30 85805.1 91705.3
94 28 30 75593.2 94762.1
95 29 30 79011.9 85971.9
96 30 30 71052.5 82380.4
97 31 30 69066.4 73320.4
98 32 30 81165.5 71147.8
99 33 30 86246.1 67442.8
100 34 30 94516.6 65455.8
101 35 30 88554.3 59299.1
102 36 30 79703.3 59897.6
103 37 30 63267.7 61914.7
104 38 30 58183.3 68824.0
105 39 30 47419.5 73067.5
106 40 30 56160.8 59917.8
107 41 30 5767.4 14563.4
108 42 30 18014.6 30161.6
109 43 30 22315.0 23924.3

```

110 44 30 27124.9 29976.4
111 45 30 48734.5 33512.0
112 46 30 58523.2 36740.5
113 47 30 63133.4 41401.6
114 999999 0 0. 0.
115 111 G 7063.082 .002 8311.09 .002 6.718 .002 0. 0. 0.
116 121 T 6968.743 .002 7666.380 0.002 9.828 .002 0. 0. 0.
117 147 T 7442.082 .002 6983.029 0.002 2.580 0.002 0. 0. 0.
118 101 G 7387.068 .002 8562.236 .002 4.376 0.002 0. 0. 0.
119 141 T 8160.715 .002 7719.359 0.002 22.365 0.002 0. 0. 0.
120 122 T 7612.182 .002 8079.167 0.002 16.128 0.002 0. 0. 0.
121 103 G 7760.526 .002 8927.915 0.002 2.364 0.002 0. 0. 0.
122 112 T 7848.143 .002 8559.282 0.002 16.467 0.002 0. 0. 0.
123 123 T 7934.488 .002 7688.873 0.002 26.043 0.002 0. 0. 0.
124 102 G 7493.983 .002 8768.081 0.002 14.257 0.002 0. 0. 0.
125 104 T 7873.115 .002 9034.204 0.002 2.583 0.002 0. 0. 0.
126 999999 T 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
127 1000. 1000. 9000. 1. 1. 1.
128 19 0. .0 -185.37 7772.445 8563.420 1543.913
129 20 0. 0. -183.26 6844.081 8345.081 1548.564
130 30 0. 0. 47.647818 6835.745 7664.015 1545.689

```

ANNEXE B Fichier BUNDLE.AER

Exemple complémentaire pour les précisions communes.

```

1<==== lere colonne des donnees
1 100.000 100.000 20.000 0.000 0.000 0.000
2 1 T 484600.000 4285900.000 80.000
3 2 T 484650.000 4285500.000 90.000
4 3 T 484550.000 4285400.000 90.000
5 4 T 484630.000 4284500.000 60.000
6 5 T 484530.000 4282580.000 40.000
7 6 T 484400.000 4283500.000 50.000
8 7 T 486400.000 4286400.000 100.000
9 8 T 486400.000 4285600.000 80.000
10 9 T 486450.000 4284900.000 60.000
11 10 T 486380.000 4284500.000 50.000
12 11 T 486250.000 4284050.000 3.000
13 999999 & 0.000 0.000 0.000

```

ANNEXE C Fichier RADCOR.AER

```
1<==== 1ere colonne des donnees
1 1
2 0.,0.
3 60.,100.
4 10.,-0.2
5 20.,-0.6
6 30.,-1.0
7 40.,-1.2
8 50.,-1.4
9 60.,-1.2
10 70.,-0.6
11 80.,0.0
12 90.,0.8
13 100.,1.7
14 110.,1.8
15 120.,1.3
16 130.,0.3
17 140.,-0.8
18 148.,-1.6
```

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg

ANNEXE 2

Modélisation du bassin versant de Super Sauze

Rapport de Stage

UFR de Géographie - CEREG
Université Louis Pasteur, Strasbourg

HENRY Jean Baptiste

Décembre 1999

Contenu de l'annexe

<i>Contenu de l'annexe</i>	2
<i>Détails de calculs en photogrammétrie aérienne et générale</i>	3
1. Contenu de la matrice rotation	3
2. Relations différentielles pour la méthode des faisceaux	3
3. La transformation linéaire directe	4
<i>Résultats de calibration</i>	6
4. Marques repères RICOH	6
5. Valeurs des distorsions radiales	7
6. Réseau de calibration ENSAIS	7
<i>Composition des bandes</i>	8
<i>Code source des modules complémentaires</i>	9
7. Procédures identiques	9
8. Programme ppa.exe	10
9. Programme aphoblo.exe	11
10. Programme aerophotomod.exe	13

Détails de calculs en photogrammétrie aérienne et générale

1. Contenu de la matrice rotation

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ \cos\omega \sin\kappa + \sin\phi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\phi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin\kappa - \cos\phi \cos\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix} \quad [A1]$$

2. Relations différentielles pour la méthode des faisceaux

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \xi_0 - c \frac{Z_X}{D} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = \eta_0 - c \frac{Z_Y}{D} \end{aligned} \quad [A2]$$

Expression des dérivées partielles des relations [A.2] (KRAUS 1998)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial X_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{13}Z_X - r_{11}D) = a_2 & \frac{\partial \eta}{\partial X_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{13}Z_Y - r_{12}D) = b_2 \\ \frac{\partial \xi}{\partial Y_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{23}Z_X - r_{21}D) = a_3 & \frac{\partial \eta}{\partial Y_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{23}Z_Y - r_{22}D) = b_3 \\ \frac{\partial \xi}{\partial Z_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{33}Z_X - r_{31}D) = a_4 & \frac{\partial \eta}{\partial Z_0} &= -\frac{c}{D^2} (r_{33}Z_Y - r_{32}D) = b_4 \end{aligned} \quad [A3]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial \omega} &= -\frac{c}{D} \left\{ ((Y - Y_0)r_{33} - (Z - Z_0)r_{23}) \frac{Z_X}{D} - (Y - Y_0)r_{31} + (Z - Z_0)r_{21} \right\} = a_5 \\ \frac{\partial \eta}{\partial \omega} &= -\frac{c}{D} \left\{ ((Y - Y_0)r_{33} - (Z - Z_0)r_{23}) \frac{Z_Y}{D} - (Y - Y_0)r_{32} + (Z - Z_0)r_{22} \right\} = b_5 \\ \frac{\partial \xi}{\partial \phi} &= \frac{c}{D} \left\{ (Z_X \cos\kappa - Z_Y \sin\kappa) \frac{Z_X}{D} + D \cos\kappa \right\} = a_6 \\ \frac{\partial \eta}{\partial \phi} &= \frac{c}{D} \left\{ (Z_X \cos\kappa - Z_Y \sin\kappa) \frac{Z_Y}{D} - D \sin\kappa \right\} = b_6 \\ \frac{\partial \xi}{\partial \kappa} &= -\frac{c}{D} Z_Y = a_7 & \frac{\partial \eta}{\partial \kappa} &= -\frac{c}{D} Z_X = b_7 \end{aligned} \quad [A4]$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \xi}{\partial X} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{11} - Z_X r_{13}) = a_8 & \frac{\partial \eta}{\partial X} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{12} - Z_Y r_{13}) = b_8 \\
\frac{\partial \xi}{\partial Y} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{21} - Z_X r_{23}) = a_9 & \frac{\partial \eta}{\partial Y} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{22} - Z_Y r_{23}) = b_9 \\
\frac{\partial \xi}{\partial Z} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{31} - Z_X r_{33}) = a_{10} & \frac{\partial \eta}{\partial Z} &= -\frac{c}{D^2}(Dr_{32} - Z_Y r_{33}) = b_{10}
\end{aligned}
\tag{A5}$$

Avec les expressions de ces coefficients, on peut alors calculer des valeurs approchées des inconnues. Plusieurs méthodes s'offrent alors : le plan de vol fournira la valeur κ^0 , les autres rotations étant mises à 0 ; les valeurs approchées des coordonnées des centres de projection et des points nouveaux pourront être obtenus soit par une compensation en bloc par modèles indépendants¹, soit par transformation linéaire directe (DLT²).

Dans le cas, où la fixation des valeurs approchées semble hasardeuse, ou tout simplement pour affiner le calcul, il est intéressant de réitérer le calcul en prenant comme valeurs approchées de départ les valeurs issues de la première itération. Généralement, on observe une convergence du calcul assez rapidement.

3. La transformation linéaire directe

La DLT est une combinaison d'intersection et de relèvement spatial. Le calcul de cette transformation repose alors sur l'écriture d'un système linéaire basé sur la projection centrale [A2], et fonctionne selon le schéma suivant :

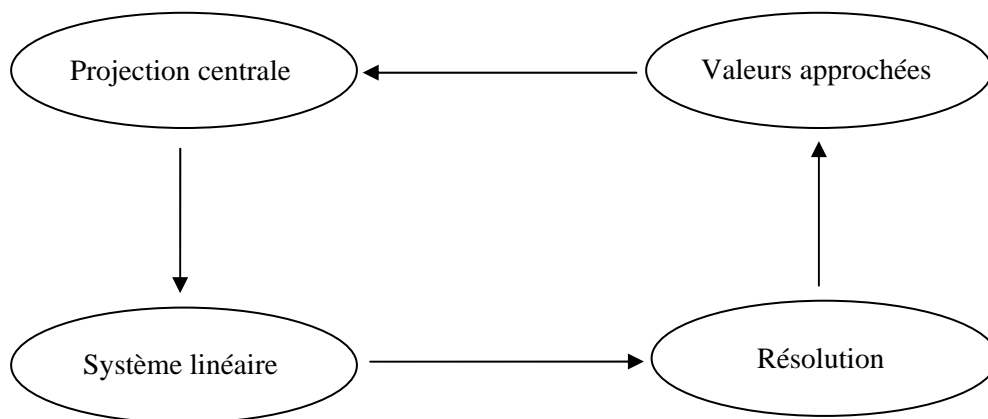


Figure 1 – Schéma de principe de la DLT

Aux 9 inconnues de la projection centrale, on en ajoute deux (différence d'échelle sur les deux axes notée m , défaut de perpendicularité des axes notée d) afin de pouvoir traiter 11 inconnues indépendantes. Les équations exprimant la projection centrale, alors dite étendue est de la forme suivante :

¹ KRAUS, Photogrammétrie Volume 1, p.280, 1998

² DLT : Direct Linear Transformation

$$\begin{aligned}
x &= \frac{a^T X + a_4}{c^T X + 1} = x_0 - c \frac{i^T (X - X_0)}{k^T (X - X_0)} \\
y &= \frac{b^T X + b_4}{c^T X + 1} = y_0 - d \cdot c \frac{i^T (X - X_0)}{k^T (X - X_0)} - m \cdot c \frac{j^T (X - X_0)}{k^T (X - X_0)}
\end{aligned} \tag{A6}$$

dans ces équations X représente le vecteur (X, Y, Z) des coordonnées terrain, X₀ le vecteur (X₀, Y₀, Z₀) des coordonnées du centre de perspective. Les vecteurs i, j, k sont les colonnes 1, 2, 3 de la matrice rotation R [A1].

On peut alors exprimer les relations entre les 11 inconnues et les paramètres de la projection centrale étendue :

$$\begin{aligned}
a &= \frac{c \cdot i - x_0 \cdot k}{k^T X_0} & b &= \frac{d \cdot c \cdot i + m \cdot c \cdot j - y_0 \cdot k}{k^T X_0} & c &= -\frac{k}{k^T X_0} \\
a_4 &= x_0 - c \frac{i^T X_0}{k^T X_0} & b_4 &= y_0 - c \frac{(d \cdot i + m \cdot j)^T X_0}{k^T X_0} \\
x_0 &= \frac{a^T c}{c^T c} & y_0 &= \frac{b^T c}{c^T c} & c^2 &= \frac{a^T a}{c^T c} - \left(\frac{a^T c}{c^T c} \right)^2 & p &= \sqrt{c^T c} \\
d &= \frac{(a^T b)(c^T c) - (a^T c)(c^T b)}{(a^T a)(c^T c) - (a^T c)^2} & m &= -\frac{\det[abc]}{p^3 c^2}
\end{aligned}$$

L'expression des équations d'observation, liant coordonnées image et objet, en vue d'une compensation selon les principes des moindres carrés permettant le calcul de ces paramètres est alors de la forme :

$$\begin{aligned}
\bar{x} + \bar{v}_x &= Xa_1 + Ya_2 + Za_3 + a_4 - xXc_1 - xYc_2 - xZc_3 \\
\bar{y} + \bar{v}_y &= Xb_1 + Yb_2 + Zb_3 + b_4 - xXc_1 - xYc_2 - xZc_3
\end{aligned}$$

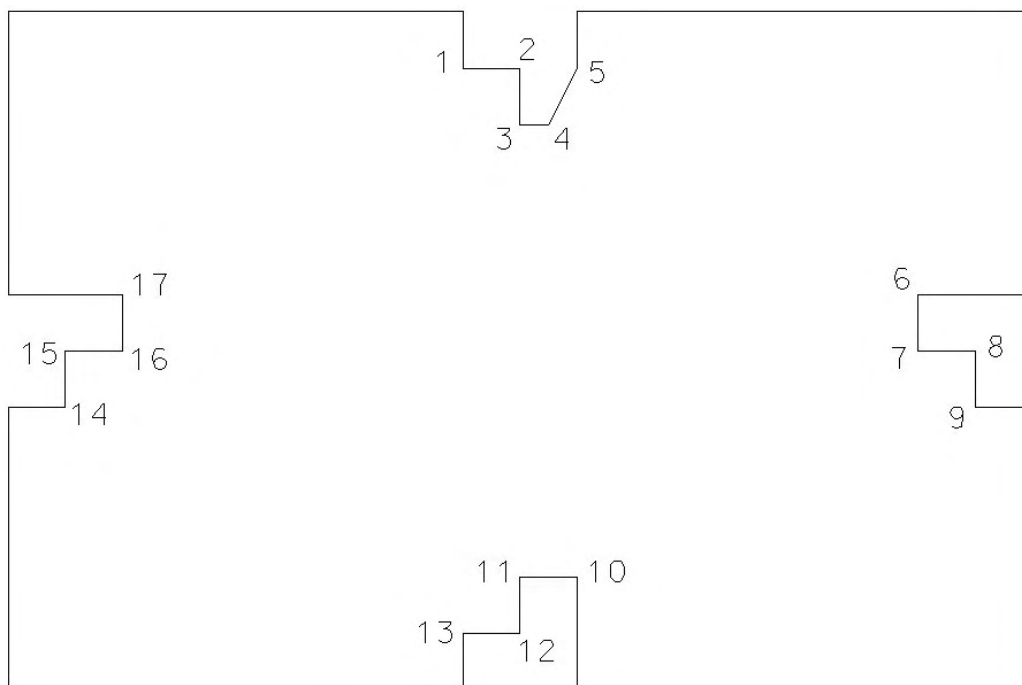
$$\text{avec } a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

Cette méthode permet d'obtenir des valeurs approchées de données d'orientation externe, pour un calcul par les faisceaux. Ses énormes avantages sont de permettre l'utilisation d'images d'origines différentes, de ne pas nécessiter la connaissance de la distance principale, de ne pas nécessiter de marques repères, d'être utilisable avec des images déformées. La seule condition est alors de disposer de suffisamment de points de calage, avec un minimum de 6.

Résultats de calibration

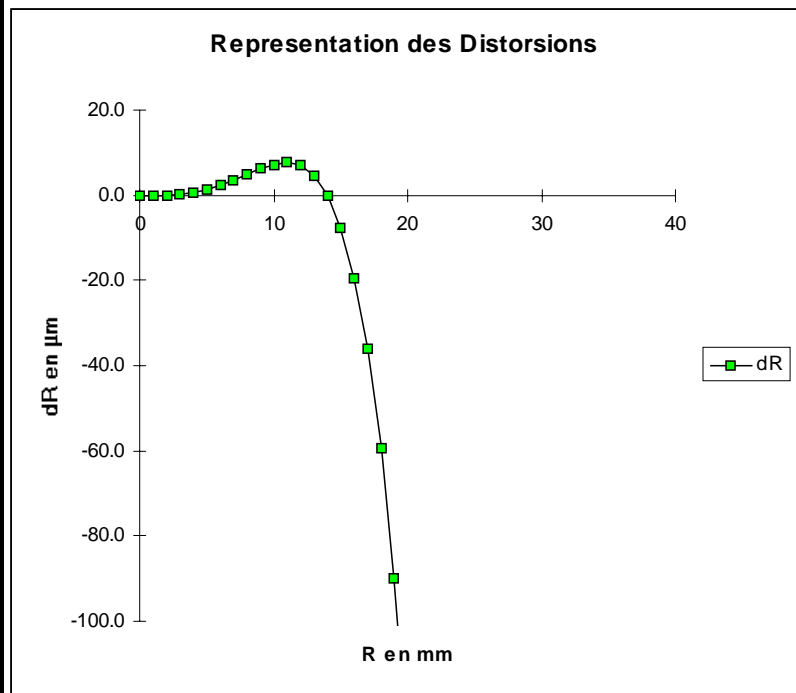
4. Marques repères RICOH

1	-1.380	10.150
2	0.060	10.080
3	0.060	8.655
4	0.542	8.646
5	1.560	9.660
6	14.680	1.630
7	14.700	0.135
8	16.208	0.140
9	16.265	-1.290
10	1.590	-8.240
11	0.090	-8.227
12	0.085	-9.635
13	-1.335	-9.670
14	-15.985	-1.300
15	-15.940	0.143
16	-14.655	0.165
17	-14.460	1.643



5. Valeurs des distorsions radiales

R en mm	dR
0	0.0
1	-0.1
2	-0.1
3	0.1
4	0.5
5	1.2
6	2.3
7	3.5
8	4.9
9	6.2
10	7.2
11	7.6
12	6.9
13	4.6
14	0.0
15	-7.7
16	-19.4
17	-36.2
18	-59.2
19	-90.0
20	-130.0
21	-181.1
22	-245.1



6. Réseau de calibration ENSAIS



Vue partielle du réseau de calibration de l'ENSAIS

Composition des bandes

	Bande 2									
Image BMP	201	202	203	204	205	206	207	208	209	211
Image PCD	47	48	49	50	51	53	54	55	56	58

	Bande 3							
Image BMP	301	302	303	304	306	307	308	310
Image PCD	59	60	61	62	64	65	66	68

	Bande 4					
Image BMP	401	402	403	404	405	406
Image PCD	69	70	71	72	73	74

	Bande 5							
Image BMP	501	502	503	504	505	506	507	508
Image PCD	1	2	3	4	5	6	7	8

	Bande 7					
Image BMP	701	702	703	704	705	706
Image PCD	18	19	20	21	22	23

	Bande 8				
Image BMP	801	803	805	807	809
Image PCD	25	27	29	31	33

	Bande 9			
Image BMP	901	902	903	905
Image PCD	82	83	84	86

Code source des modules complémentaires

7. Procédures identiques

```
Private Sub browse1_Click()  
    CommonDialog1.Flags = cdlOFNFileMustExist  
    CommonDialog1.Filter = "Fichier pdb (*.pdb)|*.pdb|"  
    CommonDialog1.FilterIndex = 2  
    CommonDialog1.ShowOpen  
    fichier.Caption = CommonDialog1.filename
```

```
End Sub
```

```
Function suppr_droite(entree, carac) As String  
    Dim lg  
    Dim sortie  
  
    sortie = ""  
    lg = Len(entree)  
    Do Until (Right(sortie, 1) = carac)  
        sortie = Left(entree, (lg - 1))  
        lg = Len(sortie)  
    Loop  
    suppr_droite = Left(sortie, (lg - 1))  
End Function
```

```
Function suppr_gauche(entree, carac) As String  
    Dim pos  
  
    pos = 0  
    Do Until (Mid(entree, (Len(entree) - pos), 1) = carac)  
        pos = pos + 1  
    Loop  
    suppr_gauche = Mid(entree, (Len(entree) - pos + 1), pos)  
End Function
```

8. Programme ppa.exe

```
Sub calcul()
```

```
'chêche les points en coordonnées images dans le fichier
```

```
fical = "d:\jb\reperes.cal"
```

```
Open fical For Input As #1
```

```
Do
```

```
Line Input #1, line1
```

```
Loop Until (Val(Mid(line1, 1, 2)) = Val(point1.Text))
```

```
X1 = Val(Mid(line1, 4, 7))
```

```
Y1 = Val(Mid(line1, 12, 6))
```

```
Close #1
```

```
Open fical For Input As #1
```

```
Do
```

```
Line Input #1, line1
```

```
Loop Until Val(Mid(line1, 1, 2)) = Val(point2.Text)
```

```
X2 = Val(Mid(line1, 4, 7))
```

```
Y2 = Val(Mid(line1, 12, 6))
```

```
Close #1
```

```
Open fical For Input As #1
```

```
Do
```

```
Line Input #1, line1
```

```
Loop Until Val(Mid(line1, 1, 2)) = Val(point3.Text)
```

```
x3 = Val(Mid(line1, 4, 7))
```

```
y3 = Val(Mid(line1, 12, 6))
```

```
Close #1
```

```
Open fical For Input As #1
```

```
Do
```

```
Line Input #1, line1
```

```
Loop Until Val(Mid(line1, 1, 2)) = Val(point4.Text)
```

```
x4 = Val(Mid(line1, 4, 7))
```

```
y4 = Val(Mid(line1, 12, 6))
```

```
Close #1
```

```
'calcul du point d'intersection
```

```
a1 = (Y2 - Y1) / (X2 - X1)
```

```
a2 = (y4 - y3) / (x4 - x3)
```

```
b1 = Y1 - a1 * X1
```

```
b2 = y3 - a2 * x3
```

```
X = (b2 - b1) / (a1 - a2)
```

```
Y = a1 * X + b1
```

```
Debug.Print X
```

```
Debug.Print Y
```

```
'calcul de la translation en coordonnées image
```

```
transX = 0.434 - X
```

```
transY = 0.161 - Y
```

```
Debug.Print transX
Debug.Print transY

'transformation en pixels, unité modèle
transXpixel = transX * 86.617
transYpixel = transY * 86.617

'affichage des nouvelles coordonnées du PPA

Open fichier For Input As #1
  Do
    Line Input #1, line1
    Loop Until (Left(line1, 10) = "XNormRight")
    Line Input #1, line2
    Xdfin = (Val(suppr_gauche(line1, "=")) + transXpixel) / 86.617
    xd.Caption = Xdfin
    Ydfin = (Val(suppr_gauche(line2, "=")) + transYpixel) / 86.617
    yd.Caption = Ydfin
  Close #1

Open fichier For Input As #1
  Do
    Line Input #1, line1
    Loop Until (Left(line1, 9) = "XNormLeft")
    Line Input #1, line2
    Xgfin = (Val(suppr_gauche(line1, "=")) + transXpixel) / 86.617
    xg.Caption = Xgfin
    Ygfin = (Val(suppr_gauche(line2, "=")) + transYpixel) / 86.617
    yg.Caption = Ygfin
  Close #1

End Sub
```

9. Programme aphoblo.exe

```
Private Sub directory_change()
  ChDir "C:\\"
  File1.Path = directory.Path
End Sub

Private Sub drive1_change()
  ChDrive "C"
  On Error GoTo erreur
  directory.Path = Drive1.Drive
  Exit Sub
erreur:
  Dim rep As Integer
  rep = MsgBox(Err.Description, 5, "Erreur !")
  If rep = 4 Then Resume
End Sub
```



```
Sub create_ae1()
Dim lect, sources, files, racine, dir1, dir2, line1, cible1, cible2, ae1
Dim img, ng, imd, nd, lg
Dim nb_files
Dim exist As Boolean

'sélection du répertoire source
drive1_change
directory_change
File1.Pattern = "*.pdb"
sources = directory.Path
nb_files = File1.ListCount

'sources = CurDir
Debug.Print sources
'recherche du répertoire racine de la source
racine = suppr_droite(sources, "\\")

'création des répertoires de travail et de sauvegarde
dir1 = racine & "\\pdb"
dir2 = racine & "\\pdbsave"

exist = False
If (Dir(racine & "\\*.ae1") = "Aphoblo.ae1") Then
    Dim rep
    rep = MsgBox("Le fichier a déjà été créé. Voulez vous l'effacer?", vbYesNo, "Avertissement")
    If rep = 6 Then
        exist = True
    Else
        End
    End If
Else
    MkDir (dir1)
    MkDir (dir2)
End If

dir1 = dir1 & "\\"
dir2 = dir2 & "\\"

'copie des fichiers dans les répertoires de travail et de sauvegarde
'création et écriture du fichier .AE1
ae1 = racine & "\\Aphoblo.ae1"
Open ae1 For Output As #1
Print #1, dir1
Print #1, dir2

For i = 0 To (nb_files - 1)
chemin = sources & "\\" & File1.List(i)
cible1 = dir1 & File1.List(i)
cible2 = dir2 & File1.List(i)
FileCopy chemin, cible1
FileCopy chemin, cible2

'recherche des numéros de photos dans les fichiers pdb
Open cible1 For Input As #2
```

```
'numéro de la photo de gauche
Do
  Line Input #2, line1
Loop Until (Left(line1, 9) = "LeftImage")
img = suppr_droite(line1, ".")
ng = suppr_gauche(img, "\") 'suppression du chemin

'formatage du numéro à 8 caractères, alignés à droite
ng = Space(8 - Len(ng)) & ng

'numéro de la photo de droite
Do
  Line Input #2, line1
Loop Until (Left(line1, 10) = "RightImage")
imd = suppr_droite(line1, ".")
nd = suppr_gauche(imd, "\") 'suppression du chemin

'formatage du numéro à 8 caractères, alignés à droite
nd = Space(8 - Len(nd)) & nd

Close #2

pdb = suppr_droite(File1.List(i), ".")

'concaténation et écriture des lignes de référence aux bases de données
line1 = ng & " " & nd & " " & pdb
Print #1, line1

Next i
Close #1
Form1.Hide

If exist Then
fin = MsgBox("Fichier " & ae1 & " écrasé ", vbInformation, "Fin de traitement")
Else
fin = MsgBox("Fichier " & ae1 & " créé", vbInformation, "Fin de traitement")
End If

End Sub
```

10. Programme aerophotomod.exe

```
Private Sub ok_Click()

Dim line1, line2, ref, coorg, num As String
Dim file1, file2
Dim pos1, pos2 As Integer
Dim trans

file1 = Label2.Caption
file2 = Label3.Caption
Open file1 For Input As #1
Open file2 For Input As #2
```

```
'Vérification du fichier de sortie
Do
Input #2, line2
If (Left(line2, 13) = "RefPointCount") Then
    avert = MsgBox("Transfert déjà effectué", vbExclamation, "Préparation de
l'aérotriangulation")
    Form1.Hide
End
End If
Loop Until EOF(2)

Close #2
Open file2 For Append As #2

Print #2, ""

'insertion de la référence au fichier de distorsions
If (Label4.Caption <> "") Then
    Print #2, "Distortion=" & Label4.Caption
End If

'insertion de la focale
Do
Line Input #1, line1
Loop Until (Left(line1, 5) = "Focus")
Print #2, line1
Close #1

'insertion du taux d'echantillonnage des images d'entrée
Open file1 For Input As #1
Do
    Line Input #1, line1
Loop Until (Left(line1, 14) = "PixelPerMeterX")
Print #2, line1
Line Input #1, line1
Print #2, line1
Close #1

'recherche des résultats de l'orientation interne du cliché droit
'dans le fichier d'entrée
Open file1 For Input As #1
Do
    Line Input #1, line1
Loop Until (Left(line1, 12) = "RightCrosses")
Close #1

'coordonnées image des reperes de fond de chambre
Print #2, "LeftCrosses=" & Mid(line1, 14, Len(line1) - 12)

Open file1 For Input As #1
Do
    Line Input #1, line1
Loop Until (Left(line1, 10) = "XNormRight")
Line Input #1, line2
```

```
'coordonnées image du point principal
Print #2, "XNormLeft=" & suppr_gauche(line1, "=")
Print #2, "YNormLeft=" & suppr_gauche(line2, "=")
Close #1
```

'Recherche du nombre de points de référence dans le fichier d'entrée

```
Open file1 For Input As #1
Do
Input #1, line1
Loop Until (Left(line1, 13) = "RefPointCount")
```

'Mémorisation du nombre de points de référence dans le fichier d'entrée

```
nb_pt_ref = Right(line1, 2)
```

'parametres du systeme de coordonnées terrain et du type de projection

```
Print #2, "CoordOrient=RightHanded"
Print #2, "CoordSystem=MapProjection"
Print #2, "UserUnits=Meter"
Print #2, "EarthRadius=6.37e+06"
```

coord:

'Recherche des coordonnées image des points de référence dans le fichier d'entrée

```
i = 0
Do
  Do
    Line Input #1, line1
    ref = Left(line1, 8)
    If (ref <> "RefPoint") And (EOF(1))) Then Exit Sub
  Loop Until (Left(line1, 8) = "RefPoint")
```

'Extraction des mesures image droite (fichier d'entrée) et transfert en mesures

'image gauche (fichier de sortie)

```
pos1 = InStr(line1, "[")
If pos1 = 0 Then GoTo coord
pos2 = InStr(line1, "]")
pos2 = pos2 - 8 - pos1
pos1 = pos1 + 1
coorg = Mid(line1, pos1, pos2)
```

```
If (i < 10) Then
  ind = "0" & i
Else
  ind = i
End If
```

```
line2 = ref & ind & "=" & "(" & coorg & ")"
```

'Concaténation des chaînes de coordonnées image et des chaînes de numéro et

'coordonnées terrain (fictives ou non)

```
pos1 = InStr(line1, "-")
pos2 = InStr(pos1, line1, ")")
pos3 = pos2 - pos1
num = Mid(line1, pos1, pos3 + 1)
line2 = line2 & num
```

```
pos1 = InStr(pos2, line1, "(")
pos3 = InStr(pos2 + 1, line1, ")")
pos3 = pos3 - pos1
num = Mid(line1, pos1, pos3 + 2)
line2 = line2 & num

'Ecriture dans le fichier de sortie de la ligne complète
Print #2, line2
i = i + 1
Loop Until (EOF(1))

Print #2, "RefPointCount=" & i

'Avertissement de fin de traitement
avert = MsgBox("Transfert terminé", vbInformation, "Préparation de l'aérotriangulation")
Form1.Hide

Close #1
Close #2

End
End Sub
```