

Aerotriangulation Analytique : Compensation par Faisceaux

H. BOUNOUR, F. BOUCHENAK, B. TAKARLI

Centre des Techniques Spatiales

BP. 13 Arzew-31200 – Algérie

bounour39@hotmail.com

ملخص :

يتمحور موضوع هذه المقالة حول عملية تعويض كتلة صورة ضوئية بطريقة الحزم. تهدف هذه الدراسة الى إعداد برنامج التثليث الجوي بطريقة التكرار، و هذا بمعزل عن جهاز القياس، مما يسهل إستعماله بسهولة. تركز التطبيق على كل الصور الضوئية لمنطقة أرزيو في مقياس 1/2 0000، مجهزة في نقاط مجسمة. النتائج المحصل عليها بتقنية الحزم ذات نوعية أفضل من تلك المحصل عليها بالنماذج المستقلة (M4-3 ou M7) أو بالشريط.

Résumé : Le thème développé à travers cet article porte sur le processus de compensation d'un bloc de photographies par la méthode de faisceaux. Le but de cette étude est l'élaboration d'un programme d'aerotriangulation par la méthode itérative, et ce indépendamment de l'instrument de mesure, ce qui facilitera aisément son emploi.

L'application a porté sur un jeu de photographies de la région d'Arzew, à l'échelle du 1/20000, équipées en points de stéréopréparation. Les résultats obtenus par la technique des faisceaux sont de meilleure qualité que ceux obtenus par les modèles indépendants (M4-3 ou M7) ou par bande.

Mots clés : Compensation, faisceaux, aérottriangulation, précision.

Abstract: The theme developed through this article is about the process of the compensation of a photograph block by the method of bundles. The goal of this survey is the development of an aerotriangulation program by method iterative, and this independently of the instrument of measure, what will facilitate its use comfortably.

The application was used a whole of photographs of the Arzew region, at scale 1/20000, equipped in points of stereopreparation. Results carried out by the technique of bundles are better quality than those obtained by the independent models (M4-3 or M7) or by strip.

Key words : Compensation, bundles, aérottriangulation, precision.

1. Introduction

De nos jours, la technique d'aerotriangulation s'est considérablement développée en terme de précision, apportant des résultats importants dans différents domaines tels que :

- La cartographie : aux petites, moyennes et grandes échelles.
- Le cadastre : coordonnées des bornes situées en limites des propriétés.
- Les levés de génie-civil : chantier d'autoroute, auscultation des ouvrages d'arts, ...etc.
- La densification des réseaux géodésiques.

L'aerotriangulation utilise trois principales méthodes de compensation de bloc qui sont tributaires de l'unité photogrammétrique utilisée (le faisceau, le modèle ou la bande) :

- La compensation par bande (compensation polynomiale) qui exige que les données soient des coordonnées bande (méthode de SCHUT).
- La compensation par modèles indépendants qui nécessite que les coordonnées soient des coordonnées modèle (y compris les coordonnées des centres perspectifs) (PAT M4-3 de STUTTGART).
- La compensation par faisceaux qui exige que les coordonnées soient des coordonnées cliché [5].

Le travail présenté dans cet article s'est focalisé autour du troisième point qui consiste principalement à l'élaboration d'un programme de compensation d'un bloc de photographies par la méthode de faisceaux. Les tests effectués ont porté sur l'ajustement par faisceaux d'un bloc de photographies à l'échelle du 1/20000, de la région d'Arzew.

2. Principe de la méthode de compensation par faisceau

Théoriquement, la méthode de compensation par faisceaux fournit de meilleurs résultats, spécialement lorsque la technique d'autocalibration est utilisée. Le modèle fonctionnel de cette approche repose sur le principe de la **colinéarité** (relations perspectives qui existent entre l'image et le point sur le terrain) décrit ci-dessous [9].

La photogrammétrie est une projection centrale dans laquelle on distingue l'espace objet qui correspond au terrain, de l'espace image qui correspond au fond de chambre de la caméra. Pour réaliser cette projection, la condition géométrique est d'avoir des vecteurs colinéaires, c'est-à-dire que le point image; le centre de projection et le point objet, se situent sur la même droite dans l'espace.

Les équations de colinéarité (1) permettent de passer d'un point objet à un point image :

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (1)$$

- (x, y) : coordonnées d'un point P dans le système image
- (x'_0, y'_0) : coordonnées du point principal dans le système image
- (X, Y, Z) : coordonnées d'un point P dans le système objet
- (X_0, Y_0, Z_0) : coordonnées du centre de projection dans le système objet
- c : distance principale
- λ : facteur d'échelle
- R : matrice rotation du repère image dans le repère objet

Les systèmes de coordonnées objet et image n'étant pas parallèles, il faut effectuer une rotation $[R]$ permettant de passer du système image au système objet :

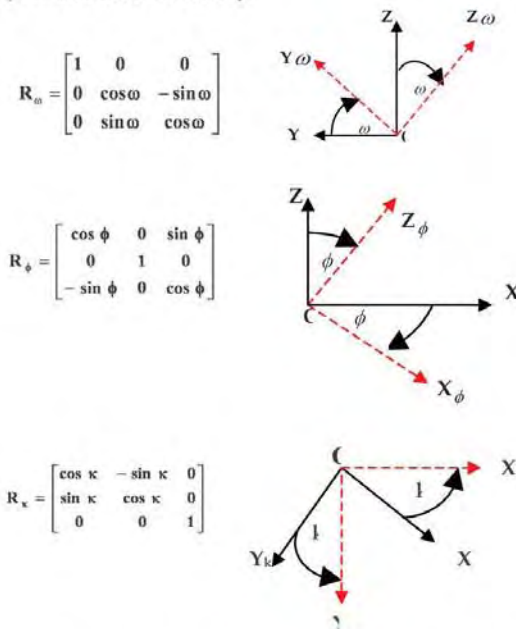
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} \quad (2)$$

La matrice $[R]$ représente le produit de trois matrices de rotation [3] :

$[R_\omega]$: rotation autour de l'axe des X d'un ω angle (site ou roulis)

$[R_\phi]$: rotation autour de l'axe des Y d'un angle κ (convergence ou tangage)

$[R_\kappa]$: rotation autour de l'axe des Z d'un angle ϕ (déversement ou lacet).



$$R_{\text{total}} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\kappa + \sin\phi\sin\kappa\sin\omega & \sin\phi\cos\kappa - \cos\phi\sin\kappa\sin\omega & \sin\phi\cos\omega \\ \cos\phi\sin\kappa + \sin\phi\cos\kappa\sin\omega & \sin\phi\sin\kappa - \cos\phi\cos\kappa\sin\omega & \sin\phi\sin\omega \\ -\sin\phi\cos\kappa + \cos\phi\sin\kappa\sin\omega & \cos\phi\cos\kappa + \sin\phi\sin\kappa\sin\omega & \cos\phi\sin\omega \end{bmatrix}$$

En divisant la première et la deuxième composante de l'équation (1) par la troisième, le facteur d'échelle se trouve éliminé pour donner les équations générales de la projection exprimant les coordonnées objet en fonction des coordonnées image :

$$\begin{aligned} X_i &= X_0 + (Z_i - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) - r_{13}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \\ Y_i &= Y_0 + (Z_i - Z_0) \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) - r_{23}c}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (3)$$

Les paramètres r_{ij} for^K références aux termes de la matrice rotation $R \phi \omega$.

3. Orientation des images

Selon les données dont dispose l'opérateur, l'orientation des images peut être réalisée de 2 manières différentes :

- Si les caractéristiques de la caméra utilisée sont inconnues, la seule solution pour orienter les images est d'utiliser la méthode de la Transformation Linéaire Directe (DLT). Tous les paramètres d'orientation des images sont déterminés en 1 seule étape. Cette méthode nécessite la connaissance d'au moins de 6 points de calage correctement répartis dans l'espace tridimensionnel.
- Si les caractéristiques de la caméra sont connues, l'opérateur a tout intérêt d'utiliser une méthode d'orientation des images qui décompose le calcul en 2 grandes étapes : l'orientation interne et l'orientation externe. Cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats et les points de calage ne sont pas indispensables (mais conseillés) [1].

3.1 Orientation interne (formation du faisceau)

L'orientation interne se caractérise principalement par une transformation du système de coordonnées; il s'agit de passer des coordonnées comparateur aux coordonnées photo (système de coordonnées des marques repères). Comme on souhaite connaître la précision des opérations, un calcul d'erreur moyenne quadratique est effectué.

Pour cela, il faut au moins pouvoir mesurer 4 marques sur chacune des photos. En général, cette contrainte ne pose pas de problèmes, car les appareils photos ont tous au moins 4 marques repères ou croix du réseau étalonnées.

3.1.1 Acquisition des données

L'obtention de coordonnées clichés se fait sur un comparateur qui est une table plane comportant des axes orthonormés. L'observation de chaque cliché fournit les coordonnées (x', y') rapportées aux axes (o', x', y') de l'appareil utilisé. (fig. 1).

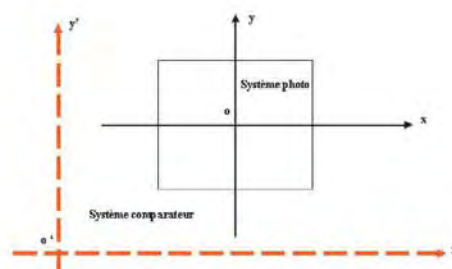


Fig. 1 Passage du système comparateur au système photo.

La formation d'un rayon perspectif impose la connaissance des coordonnées dans le système défini par les repères de la chambre de la prise de vues. Une transformation linéaire simple permet de passer du système (o', x', y') au système (o, x, y) . Les coefficients de la transformation seront calculés grâce à la connaissance des coordonnées des repères de chambre dans les deux systèmes.

La formule de passage retenue pour passer d'un système de coordonnées à l'autre est une transformation plane affine à 6 paramètres avec détermination par excès :

$$X = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

(Résolution par les moindres carrés) [10].

On obtient ainsi des coordonnées clichés planes (x, y) qui subiront par la suite des corrections de distorsion, d'étalonnage des chambres, de courbure terrestre et de réfraction atmosphérique. C'est à partir de ces coordonnées qu'est reconstitué analytiquement le faisceau perspectif.

3.1.1.1 Corrections à apporter aux coordonnées clichés

Les corrections à apporter aux coordonnées clichés sont dues à la courbure de la terre; la réfraction atmosphérique et la distorsion de l'objectif.

3.1.1.2 Correction due à la distorsion de l'objectif

Cette correction se compose d'une :

- distorsion radiale (symétrique).
- distorsion tangentielle (asymétrique).

La distorsion radiale moyenne est mesurée lors de l'étalonnage des chambres de prises de vues sur les quatre demi diagonales. Elle est ensuite tabulée et reportée sur un graphique en fonction de la distance radiale [5].

Les valeurs positives de la distorsion signifient que le déplacement de l'image se fait vers l'extérieur de la photographie. La figure (2) représente un exemple de courbe et de table de distorsion avec $c = 88.36 \text{ mm}$:

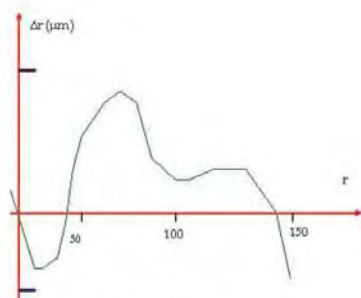


Fig. 2 Courbe de distorsion.

Distance radiale (en mm)	Distorsion (en mm)
20	- 0.024
40	0.018
60	0.046
80	0.004
100	0.014
120	0.018
140	0.001
148	0.002

La distorsion tangentielle est due au décentrement des éléments formant l'objectif. Elle est mesurée par la différence qui existe entre les valeurs de distorsion radiale déterminées le long des demi-diagonales. Les valeurs de ces corrections sont négligeables ($< \pm 5 \mu\text{m}$).

3.1.1.3 Correction due à la courbure terrestre

La courbure de la terre est assimilable à une distorsion radiale entraînant un déplacement des points de la photographie vers l'intérieur en partant du point principal. Le phénomène de la courbure est illustré sur la figure (2), ainsi l'erreur (Δr) engendrée par celui-ci est donnée par :

$$\Delta r = H_v \cdot r^3 / 2Rc^2$$

Δr en μm , r et c en mm, R en km et H_v en m

3.1.1.4 Correction due à la réfraction atmosphérique

L'effet de la réfraction atmosphérique est dû au changement de l'indice de réfraction qui diminue avec l'altitude dans le milieu hétérogène.

Les rayons lumineux ne sont pas des droites, mais des arcs de courbes contenus dans le même plan que les rayons théoriques. Elle a pour effet de créer un déplacement radial sur les points de la photographie vers l'extérieur. Cette variation est donnée par l'expression suivante [8] :

$$\Delta r = d \cdot r \cdot (1 + r^2/c^2)$$

Δr en μm , r et c en mm.

Pour illustrer l'ordre de grandeur de cette distorsion, un exemple d'une chambre grand angulaire portée par un avion à 4000 m et photographiant un terrain d'altitude moyenne 1000 m, est fourni dans le tableau (1).

Tableau 1. Extrait des tables de l'O.I.A.C

H_v (km)	d	H_v (km)	d
0.5	0.0066	5.5	0.0561
1.0	0.0129	6.0	0.0597
1.5	0.0187	6.5	0.0630
2.0	0.0243	7.0	0.0660
2.5	0.0297	7.5	0.0690
3.0	0.0349	8.0	0.0716
3.5	0.0396	8.5	0.0740
4.0	0.0441	9.0	0.0763
4.5	0.0484	9.5	0.0784
5.0	0.0523	10.0	0.0804

On conçoit donc, l'importance de ces deux distorsions surtout quand la hauteur de vol H augmente.

Après avoir corrigé les coordonnées clichés, le système des coordonnées du faisceau s'obtient simplement en translatant l'origine du système lié au point principal de la photographie d'une distance égale à la distance principale. L'origine ainsi obtenue est confondue avec le centre de projection O . Tous les points déjà identifiés auront une cote négative [11].

3.2 Orientation externe

Plus connue sous le nom de méthode des faisceaux, cette méthode relie directement les coordonnées photos aux coordonnées objets. Le but de cette orientation est de déterminer pour chaque image, la position $X_0Y_0Z_0$ du centre de l'objectif et son orientation $(\omega, \varphi, \kappa)$ par rapport au système de coordonnées des points de calage [7].

La détermination des 12 inconnues s'effectue à partir des relations liant les coordonnées photo aux coordonnées terrain. Les éléments connus sont :

- c : la distance principale
- x_i, y_i et X_i, Y_i, Z_i respectivement les coordonnées cliché et les coordonnées terrain d'au moins trois points.

Le modèle fonctionnel est donné par les relations suivantes :

$$x + v_{xi} = -c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) - r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) - r_{33}(Z-Z_0)} = f(x)$$

$$y + v_{yi} = -c \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) - r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) - r_{33}(Z-Z_0)} = f(y)$$

Ces deux dernières équations représentent une droite dans l'espace passant par 3 points o, p et P. Elles sont rigoureuses et non linéaires en fonction des six inconnues $X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$.

3.2.1 Linéarisation

On remplace chaque inconnue par une valeur approchée à laquelle on ajoute une correction :

$$\begin{cases} X_0 = \bar{X}_0 + \Delta X_0 \\ Y_0 = \bar{Y}_0 + \Delta Y_0 \\ Z_0 = \bar{Z}_0 + \Delta Z_0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \omega = \bar{\omega} + \Delta\omega \\ \varphi = \bar{\varphi} + \Delta\varphi \\ \kappa = \bar{\kappa} + \Delta\kappa \end{cases}$$

Les deux équations de colinéarité sont fonction des inconnues :

$$x_i + v_{xi} = f_x(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0) \quad (4)$$

$$y_i + v_{yi} = f_y(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0) \quad (5)$$

En différenciant par rapport aux inconnues, on obtient les relations suivantes :

$$x_i + v_{xi} = \bar{f}_x + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial \bar{f}_x}{\partial Z_0} \Delta Z_0 \quad (6)$$

$$y_i + v_{yi} = \bar{f}_y + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial \bar{f}_y}{\partial Z_0} \Delta Z_0 \quad (7)$$

Où $\bar{f}_x = (\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ et $\bar{f}_y = (\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$

$$x_i + v_{xi} = \frac{r_{11}(X_i - \bar{X}_0) + r_{21}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{31}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = \frac{Ax_1 \Delta\omega + Ax_2 \Delta\varphi + Ax_3 \Delta\kappa + Ax_4 \Delta X_0 + Ax_5 \Delta Y_0 + Ax_6 \Delta Z_0}{Ax_6 \Delta Z_0} \quad (8)$$

$$y_i + v_{yi} = \frac{r_{12}(X_i - \bar{X}_0) + r_{22}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{32}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = \frac{Ay_1 \Delta\omega + Ay_2 \Delta\varphi + Ay_3 \Delta\kappa + Ay_4 \Delta X_0 + Ay_5 \Delta Y_0 + Ay_6 \Delta Z_0}{Ay_6 \Delta Z_0} \quad (9)$$

Où r_{ij} sont les coefficients de la matrice rotation construite à l'aide des valeurs approchées des rotations : ω, φ, κ .

Les équations de colinéarité linéarisées peuvent être représentées en notation matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} Ax_1 & Ax_2 & Ax_3 & Ax_4 & Ax_5 & Ax_6 \\ Ay_1 & Ay_2 & Ay_3 & Ay_4 & Ay_5 & Ay_6 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix}_{ij}$$

Avec :

$$r_{x_{ij}} = X_{ij} + c \frac{r_{11}(X_i - \bar{X}_0) + r_{21}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{31}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = X_{ij} + \frac{\bar{X}_{ij}^*}{Z_{ij}^*} \quad (10)$$

Formation de la matrice normale réduite [4] :

Si nous utilisons les notations suivantes :

$$r_{y_{ij}} = Y_{ij} + c \frac{r_{12}(X_i - \bar{X}_0) + r_{22}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{32}(Z_i - \bar{Z}_0)}{r_{13}(X_i - \bar{X}_0) + r_{23}(Y_i - \bar{Y}_0) - r_{33}(Z_i - \bar{Z}_0)} = Y_{ij} + \frac{\bar{Y}_{ij}^*}{Z_{ij}^*} \quad (11)$$

On aura donc :

$$\begin{bmatrix} \bar{X}^* \\ \bar{Y}^* \\ \bar{Z}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^T_{(\omega, \varphi, \kappa)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - \bar{X}_0 \\ Y_i - \bar{Y}_0 \\ Z_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}_{ij} \quad \begin{matrix} X_d = (X_i - \bar{X}_0) \\ Y_d = (Y_i - \bar{Y}_0) \\ Z_d = (Z_i - \bar{Z}_0) \end{matrix}$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \omega} = -\frac{c}{Z^*} \left[-\bar{r}_{11} \bar{Y}_d + \bar{r}_{21} \bar{Z}_d - \frac{X^*}{Z^*} (-\bar{r}_{13} \bar{Y}_d + \bar{r}_{23} \bar{Z}_d) \right] \approx -c \frac{X^* Y^*}{Z^{*2}}$$

(Pour les valeurs faibles ω, φ, κ).

$$\frac{\partial f_x}{\partial \varphi} = -\frac{c}{Z^*} \left[-Z \cos \bar{\kappa} - \frac{X^*}{Z^*} (\cos \bar{\varphi} X_d - \bar{r}_{23} \text{tg} \bar{\varphi} Y_d - \bar{r}_{33} \text{tg} \bar{\varphi} Z_d) \right] \approx \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} = -c \frac{Y^*}{Z^*} ; \quad \frac{\partial f_x}{\partial X_0} = \frac{c}{Z^*} \left[\bar{r}_{11} - \bar{r}_{13} \frac{Y^*}{Z^*} \right] \approx \frac{c}{Z^*} ;$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Y_0} = \frac{c}{Z^*} \left[-\bar{r}_{21} - \bar{r}_{23} \frac{Y^*}{Z^*} \right] \approx 0$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial Z_0} = \frac{c}{Z^*} \left[\bar{r}_{31} - \bar{r}_{33} \frac{X^*}{Z^*} \right] \approx -c \frac{X^*}{Z^{*2}} ; \quad \frac{\partial f_y}{\partial Z_0} = \frac{c}{Z^*} \left[\bar{r}_{32} - \bar{r}_{33} \frac{Y^*}{Z^*} \right] \approx -c \frac{Y^*}{Z^{*2}}$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \omega} = \frac{c}{Z^*} \left[-\bar{r}_{12} \bar{Y}_d + \bar{r}_{22} \bar{Z}_d - \frac{Y^*}{Z^*} (-\bar{r}_{13} \bar{Y}_d + \bar{r}_{23} \bar{Z}_d) \right] \approx -c \left[1 + \frac{Y^2}{Z^2} \right]$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \varphi} = \frac{c}{Z^*} \left[Z \sin \bar{\kappa} - \frac{X^*}{Z^*} (\cos \bar{\varphi} X_d - \bar{r}_{23} \text{tg} \bar{\varphi} Y_d - \bar{r}_{33} \text{tg} \bar{\varphi} Z_d) \right] \approx c \frac{X^* Y^*}{Z^{*2}}$$

Les termes barrés sont variables pour les valeurs faibles de ω, φ, κ et

La matrice des coefficients des deux équations de colinéarité s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} -c \frac{X^* Y^*}{Z^{*2}} & c(1 + \frac{Y^{*2}}{Z^{*2}}) & -c \frac{Y^*}{Z^*} & \frac{c}{Z^*} & 0 & -c \frac{X^*}{Z^{*2}} \\ -c(1 + \frac{Y^{*2}}{Z^{*2}}) & c \frac{X^* Y^*}{Z^{*2}} & c \frac{X^*}{Z^*} & 0 & \frac{c}{Z^*} & -c \frac{Y^*}{Z^{*2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + c \frac{X^*}{Z^*} \\ y + c \frac{Y^*}{Z^*} \end{bmatrix}$$

3.2.2 Calcul des inconnues : Méthode itérative

La détermination des paramètres inconnus d'orientation (ω, φ et κ, X_0, Y_0, Z_0) est basée sur une méthode itérative. En pratique, trois à cinq itérations suffisent. La résolution du système exige au minimum 03 points connus en coordonnées terrain (X_i, Y_i, Z_i) et cliché (x_i, y_i), puisque chaque point permet d'écrire deux équations, soit 06 équations à 06 inconnues [9].

Une bonne estimation des inconnues (ω, φ et κ, X_0, Y_0, Z_0) requiert d'une part, de bonnes valeurs approchées ($\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \bar{\omega}, \bar{\varphi}, \bar{\kappa}$), et d'autre part, que les corrections $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ soient faibles. Pour une photo dont l'axe est quasiment vertical, on peut admettre que :

$\bar{Z}$ = altitude de vol absolue ; $\bar{\omega} = \bar{\varphi} = 0$

Si la ligne de vol n'est pas parallèle à l'axe des X du système terrain, la valeur de κ peut être très grande. Les valeurs approchées ($\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \kappa$) peuvent être obtenues par transformation linéaire conforme, en utilisant les coordonnées terrain et les coordonnées cliché correspondantes d'au moins de 02 points éloignés. Les paramètres de la transformation sont [3] :

$$a, b, C_x, C_y \quad \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & -y_i & 1 & 0 \\ y_i & x_i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ C_x \\ C_y \end{bmatrix}$$

$$\bar{\kappa} = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{et} \quad \begin{cases} \bar{X}_0 = C_x \\ \bar{Y}_0 = C_y \end{cases}$$

$\bar{Z}_0$ peut être déterminé comme suit :

$$\lambda = \sqrt{a^2 + b^2} ; \bar{Z}_0 = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{n} + \lambda.c$$

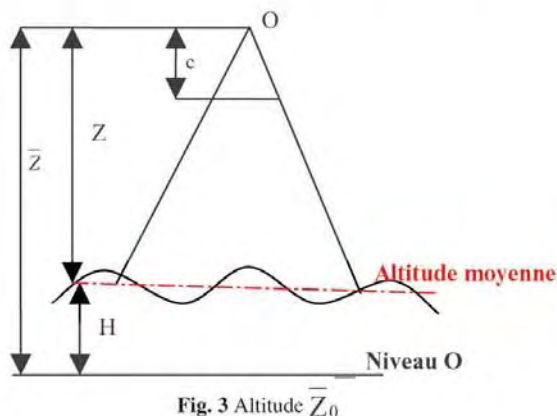


Fig. 3 Altitude $\bar{Z}_0$

$$\frac{\sum Z_i}{n} = Z : \text{hauteur moyenne du plan de vol.}$$

3.2.3 Critères d'arrêt

Les itérations doivent être arrêtées dès que les corrections aux paramètres d'orientation $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ deviennent inférieures en valeur absolue à une certaine valeur :

- Rotation ≤ 0.00001 rad
- Translation ≤ 0.01 0/00 Z

En général, afin d'éviter un nombre excessif d'itérations, le nombre maximal est fixé à 7.

3.3 Etapes de calcul

1. Calcul des paramètres de la transformation linéaire conforme, en utilisant les coordonnées terrain (X,Y) et cliché (x, y) d'au moins deux points d'appui : a, b, Cx, Cy

2. Prendre comme valeurs initiales :

$$\bar{\omega} = \bar{\varphi} = 0, \quad \bar{X}_0 = C_x, \quad \bar{Y}_0 = C_y$$

3. Calculer $\bar{\kappa}$ (en radian) : $\bar{\kappa} = \arctg \frac{b}{a}$

4. Prendre pour valeur initiale

$$\bar{H}_0 = H_{moy} + \lambda.c.$$

5. Formation de la matrice orthogonale $\bar{R}$.

6. Calculer pour chaque point

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_i^* \\ \bar{Y}_i^* \\ \bar{Z}_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{R}^T(\bar{\omega}, \bar{\varphi}, \bar{\kappa}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - \bar{X}_0 \\ Y_i - \bar{Y}_0 \\ Z_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}_{ij}$$

7. Calculer les coefficients des deux équations de colinéarité :

$$\begin{bmatrix} Ax_1 & Ax_2 & Ax_3 & Ax_4 & Ax_5 & Ax_6 \\ Ay_1 & Ay_2 & Ay_3 & Ay_4 & Ay_5 & Ay_6 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\varphi \\ \Delta\kappa \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix}_{ij}$$

8. Formation des équations normales et résolution pour les corrections : $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$.

9. Calculer les nouvelles valeurs approchées pour les 6 inconnues :

$$\begin{aligned} \bar{X}_{0\text{nouv}} &= \bar{X}_{0\text{anc}} + \Delta X_0 \\ \bar{Y}_{0\text{nouv}} &= \bar{Y}_{0\text{anc}} + \Delta Y_0 \\ \bar{Z}_{0\text{nouv}} &= \bar{Z}_{0\text{anc}} + \Delta Z_0 \\ \bar{\omega}_{\text{nouv}} &= \bar{\omega}_{\text{anc}} + \Delta\omega \\ \bar{\varphi}_{\text{nouv}} &= \bar{\varphi}_{\text{anc}} + \Delta\varphi \\ \bar{\kappa}_{\text{nouv}} &= \bar{\kappa}_{\text{anc}} + \Delta\varphi \end{aligned}$$

10. Contrôle des valeurs des corrections ($|\Delta\omega|$, $|\Delta\phi|$, $|\Delta\kappa|$, $|\Delta X_0|$, $|\Delta Y_0|$, $|\Delta Z_0|$) par rapport aux tolérances fixées.

11. Contrôle du nombre d'itérations qui doit être égal au nombre maximal fixé.

La validité de la solution peut être contrôlée en calculant les valeurs des résidus des coordonnées du cliché de la manière suivante :

$$V_{xi} = X_i - c \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{21}(Y_i - Y_0) - r_{31}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) - r_{33}(Z_i - Z_0)} = f(x)$$

et

$$V_{yi} = Y_i - c \frac{r_{12}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) - r_{32}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) - r_{33}(Z_i - Z_0)} = f(y)$$

Ces résidus doivent être théoriquement nuls ou inférieurs à la tolérance fixée [2].

4. Application

L'application a porté sur l'ajustement par faisceaux d'un bloc de photographies à l'échelle du 1/20000, de la région d'Arzew. Ce site a été choisi pour des raisons de proximité, d'existence d'un canevas de points géodésiques et de stéréopréparation, et de la couverture aérienne de la région.

4.1 Préparation des données et documents

Identification des points : moyennant des fiches signalétiques des points de stéréopréparation et de points géodésiques, nous avons identifié et piqué les points sur support photo en vue de la préparation de la carte d'index et du tableau d'assemblage.

Etablissement du tableau d'assemblage : c'est un document indispensable à la gestion, à l'administration et à la planification des différentes

phases de l'aérotiangulation. Son format est de (80 x 60 cm) et il est conçu à partir des cartes au 1/25000 de la région d'Arzew 2-3, 5-6, et celle de Gdyl 1-2.

Report des points sur photos et leur numérotation : on reporte sur toutes les photographies les points avec leurs numéros correspondants, ainsi que les points principaux qui vont servir comme points de liaison entre modèles adjacents.

Les numéros sont constitués de trois champs : le premier indique le numéro de la bande, le second la position du point (5: Centre, 0: Nord, 10 Sud), et le troisième correspond au numéro de la photo.

Exemple : Le centre de la photo 95 de la bande 3, a comme numéro : [3|5|95], pour le point au Nord : [3|5-5|95] c'est à dire [3|0|95], et pour celui du Sud : [3|5+5|95], soit [4|0|95].

4.2 Observations et traitement

Les observations sont effectuées sur le stéréocomparateur PLANICOMP C 100 (ZEISS) avec deux à trois pointés par point, et même d'avantage, lorsque le contraste est médiocre. La numérotation des marques repères et le sens de leurs observations doivent être conformes au programme de calcul.

Des mesures de distances entre les marques repères ont été effectuées, afin de s'assurer du format des clichés (format WILD 212x212) pris comme référence dans le calcul des paramètres de transformation. A cet effet, et pour prendre en considération la déformation du film (défaut d'orthogonalité), nous avons utilisé la transformation affine. Les coordonnées des points déterminées doivent subir toutes les corrections décrites ci-dessus (§ III.1.1.1).

Le tableau (2) représente les fichiers des mesures sur mono comparateur :

Tableau 2. Coordonnées comparateur.

Photo N° 95			Photo N° 94			Photo N° 93		
N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}	N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}	N°	X _{comparateur}	Y _{comparateur}
1	226642	226181	1	226058	225898	1	225109	227780
2	225867	14219	2	226619	13940	2	229791	15870
3	13910	14982	3	14666	13356	3	17892	11169
4	14678	226953	4	14098	225322	4	13192	223083
276	16501	208187	3093	35088	222873	3092	28531	211773
3094	36586	187642	276	102538	203000	3093	122069	224300
3029	74588	184629	65	74590	172060	276	189656	205889
3095	139504	176608	3029	159507	180326	3031	52078	180316
3096	220474	177815	3095	223310	172930	3030	130790	177159
3594	15532	129179	3593	23730	130059	3094	209827	186160
3595	124792	110218	3594	101733	124936	65	162789	174148
3596	181718	118388	3595	209623	106894	3592	35470	100709
3597	223976	128710	336	82151	76056	3593	112888	131186
4094	21232	15132	4093	24085	32624	3594	190033	127382
4095	126454	28843	4094	107137	10613	336	171689	78264
4096	207502	31670	4095	212129	25045	4092	29292	20181
						4093	114571	34671
						4094	196661	13422

Les tableaux (3 et 4) illustrent respectivement les coordonnées "faisceaux" et "terrain compensées" :

Tableau 3. Coordonnées faisceaux ($Z_f = -152,53$ mm)

Photo N° 95

Paramètres de transformation:

$$a0 = 119.856111 \quad a1 = -0.001000 \quad a2 = 0.000004$$

$$b0 = 121.036789 \quad b1 = -0.000004 \quad b2 = -0.001000$$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _s	V _v
1	-106.001759	-105.997756	-0.001759	0.002244
2	-105.998241	105.997756	0.001759	-0.002244
3	105.998242	106.002244	-0.001758	0.002244
4	106.001758	-106.002244	0.001758	-0.002244

Précision = ± 0.004032 mm

Photo N° 94

Paramètres de transformation:

$$a0 = 120.702735 \quad a1 = -0.001000 \quad a2 = -0.000003$$

$$b0 = 119.320163 \quad b1 = 0.000003 \quad b2 = -0.001000$$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}
276	104.110128	-87.240127
3094	83.946859	-66.764889
3029	45.927309	-63.889076
3095	-19.029132	-56.102006
3096	-100.008760	-57.602412
3594	104.791678	-8.217173
3595	-4.556267	10.350891
3596	-61.462384	1.973551
3597	-103.690126	-8.502981
4094	98.675520	105.825706
4095	-6.514789	91.731660
4096	-87.566533	88.610736

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _s	V _v
1	-106.001745	-105.997995	-0.001745	0.002005
2	-105.998255	105.997995	0.001745	-0.002005
3	105.998255	106.002005	-0.001745	0.002005
4	106.001745	-106.002005	0.001745	-0.002005

Précision = ± 0.003759 mm

Photo N° 93

Paramètres de transformation:

$$a0 = 124.133737 \quad a1 = -0.00100 \quad a2 = -0.000022$$

$$b0 = 116.772536 \quad b1 = 0.000022 \quad b2 = -0.00100$$

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}	V _s	V _v
1	-106.004477	-105.998900	-0.004477	0.001100
2	-105.995522	105.998900	0.004478	-0.001100
3	105.995522	106.001100	-0.004478	0.001100
4	106.004477	-106.001100	0.004477	-0.001100

Précision = ± 0.006520 mm

N°	X _{corrigé}	Y _{corrigé}
3093	85.014114	-103.495137
276	17.603699	-83.434116
65	45.639647	-52.565285
3094	-2.070832	-63.339688
3029	-39.316180	-60.600299
3095	-103.112108	-53.028406
3593	96.621594	-10.696259
3594	18.616801	-5.358893
3595	-89.246496	12.981492
336	38.332880	43.475920
4093	96.526066	86.756470
4094	13.516258	108.998559
4095	-91.534968	94.851427

Tableau 4. Coordonnées terrain compensées

N°	X _t	Y _t	Z _t	N°	X _t	Y _t	Z _t	N°	X _t	Y _t	Z _t
2016	733650.427	39689847.714	265.18	3030	736577.859	3965051.042	136.96	24	738660.361	3966682.999	139.05
2017	735130.825	3968878.665	227.68	3031	735043.031	3964944.573	191.35	276	737888.987	3965650.330	123.28
2018	736563.061	3969106.353	159.48	3032	733509.516	3964754.733	261.11	3094	738335.302	3965253.987	115.72
2031	734720.346	3968946.974	217.95	3092	734552.231	3965543.104	245.65	3029	739130.941	3965256.360	107.00
2530	736494.138	3966963.830	139.38	65	737354.281	3964941.319	141.73	2019	738299.320	3969393.917	163.97
2531	734639.050	3966730.799	175.97	2019	738300.571	3969391.038	163.73	2020	740304.959	3969253.291	54.94
2532	733267.437	3966859.248	218.40	2529	738507.356	3967433.980	111.94	2021	742157.623	3969859.018	122.49
208	742493.775	3965724.342	238.19	3096	742253.020	3965360.076	96.68	3596	741510.728	3964025.224	99.56
3095	740517.051	3965198.357	95.86	3595	740306.315	3963762.480	95.28	4095	740470.100	3962024.379	87.24
4096	742203.281	3962207.163	110.75	4094	738256.254	3961582.521	84.76	336	737648.902	3962941.622	128.62
11	733634.810	3964816.234	257.71								

4.3 Analyse des résultats

Orientation interne : La précision des orientations internes qui est de l'ordre de 03 à 05 microns est satisfaisante. La qualité des résultats dépend principalement de la qualité des observations qui ont été réalisées avec un grand soin et contrôlées sur le format utile de la photographie.

Orientation externe : Dans l'ensemble, la qualité de l'orientation externe est bonne. Les points douteux présentant certaines anomalies ont été éliminés des traitements. Certains points géodésiques non observables au sol, tels que les points 65, 24, 64 et 11 (châteaux d'eau, torchère dans la zone industrielle, balise au sommet de montagne,...), ont été considérés comme des points nouveaux dans le traitement.

Compensation : La qualité des résultats obtenus à partir de la résolution de la matrice normale réduite est moyenne en certains points. Ceci est due à certains points présentant des anomalies citées précédemment; ce qui traduit la validité du concept théorique stipulant : toute mauvaise identification de points sur photographies se répercuterait sur la précision de l'aérottriangulation.

Pour pallier à ce genre de problèmes, il est recommandé de prévoir dans la phase planification une présignalisation (pour les grandes échelles), ou du moins choisir des points naturels remarquables et facilement identifiables sur photos (par exemple, l'un des quatre angles d'une intersection de deux pistes ou deux routes, bien contrastées,

et non pas l'intersection elle-même). Quant aux points géodésiques, il faut toujours prévoir des points auxiliaires lisibles et rattachés à ces derniers. Ces précautions permettront certainement une identification précise et sans ambiguïté des points sur photographies lors des observations.

5. Conclusion

Différentes approches existent pour la résolution du problème photogrammétrique. Dans notre cas, nous avons exposé une des méthodes les plus employées dans le domaine de l'utilisation des photographies aériennes. L'essentiel est de tenir compte du fait que les différentes approches sont basées sur la colinéarité de l'image, du centre perspectif et du point terrain.

L'existence du rapport de calibration de la caméra et de celui de scanners destinés à la photogrammétrie, nous conduirait à exploiter la méthode dite des faisceaux. Cette méthode, sous certaines conditions relatives au matériel (précision), donnerait des résultats plus précis. Cependant, son utilisation reste fonction du modèle de correction de départ qui s'appuie sur l'hypothèse point_ image, centre projection et point_ objet parfaitement alignés.

Dans le but de contrôler les résultats à chaque étape, l'orientation externe doit être exécutée en phases.

Le programme développé dans le cadre de cette étude permet, pour un bloc de photos, l'estimation des coordonnées terrain d'un nombre de points qui ne peut être limité que par les performances de l'ordinateur utilisé. Afin de répondre aux exigences du concept de l'aérottriangulation, il est recommandé de disposer d'une couverture aérienne récente et d'un canevas de points bien distribués sur l'étendue de la zone d'étude

Références Bibliographiques

- Ackermann R., 1984 : "Digital image" Transformation de coordonnées.
- Albertz, J., Kreiling, W., 1989 : "Photogrammetric Guide". Wichmann, 292p.
- Amer .F, 1998 : "Compensation d'aérottriangulation Première et deuxième partie (ITC 79).
- Benaldin. J : "Applications of photogrammetric and computer vision techniques in shake table testing".
- Bruon .D, 1998 : "The principal point and CCD cameras". Photogrammetric Record ISSN 0031-868X Coden Pgreay vol. 16, no92.
- Debarque B : "Fusion d'images aériennes et terrestres, une compensation par gerbes spatiales" (p 15-20). université Laval.
- Grussenmeyer P. & khalil O. 1998: "Solutions for exterior orientation in photogrammetry".
- Grussenmeyer P., 1996 : "Development of PC-based digital photogrammetric software at the ENSAIS"
- Hottier. p 1972 : Photogrammétrie Analytique-Photogrammétrie Générale tome4 Edition Eyrolles.
- Kraus K., Waldhäusl P., 1998 : "Manuel de photogrammétrie, principe et procédés. Fondamentaux". Editions Hermès, Paris.
- Stefanovic, 1987 : "Aerial triangulation". Part1(ITC).