

REDRESSEUR D'IMAGES NUMÉRIQUES

Michel Boulianne, Jean-Paul Agnard, Martin Côté

Centre de recherche en géomatique
Pavillon Casault, Université Laval
Ste-Foy, Québec, Canada, G1K 7P4
Commission V

RÉSUMÉ:

Depuis une cinquantaine d'années les photogrammètres disposent d'appareils de redressement. Ces redresseurs permettent de produire des photographies équivalentes à des projections orthogonales. Dû à leur complexité et à leur coût, ces appareils n'ont jamais connu une popularité égale aux services qu'ils auraient pu rendre. De nouveaux logiciels permettent maintenant de remplacer toutes les composantes mécaniques et optiques de ces redresseurs. Le redressement des photographies, préalablement numérisées, s'effectue grâce à l'estimation par moindres carrés de la transformation projective 2-D ou 3-D. Cet article discute des principaux critères et possibilités que les logiciels de redressement doivent posséder pour satisfaire les attentes des photogrammètres. Un exemple d'utilisation conclue l'article.

ABSTRACT:

For more than fifty years, photogrammetrists have been counted on rectifiers to solve some of their data acquisition problems. These rectifiers allow the production of new photographs equivalent to orthogonal projections. Because of their complexity and their high cost, the popularity of rectifiers has never been very high. With the ever increasing use of digital images in photogrammetry we are witnessing the introduction of new digital rectifiers in which all mechanical and optical parts are replaced by a piece of software. With these computer programs, the previously digitized photograph is rectified using the 2-D or 3-D projective transformations. This paper discusses the criteria and possibilities that digital rectifiers must satisfy in order to respond to photogrammetrists' needs. An example of digital rectification concludes the communication.

Mots clés: Redressement, orthophotographie, correction géométrique, traitement d'images.

1. INTRODUCTION

Suite aux travaux du Capitaine Theodor Scheimflug concernant les conditions optiques de projection au début des années 30, divers mécanismes et appareillages visant à corriger l'inclinaison d'une photographie furent développés. Des appareils, appelés redresseurs, permettent depuis lors de produire des photographies dites verticales à partir de photographies quelconques. Si le terrain photographié est relativement plat, la photographie redressée s'apparente grandement à une carte puisque l'échelle est constante. Dans le cas où le relief est plus important, des appareils de redressement différentiel ou d'orthophotographies furent inventés. Ces derniers corrigent les variations d'échelle produites par l'inclinaison du plan photographique et éliminent le déplacement des points-image causé par le relief.

Les redresseurs présentement sur le marché partagent tous la même complexité mécanique et optique et, par voie de conséquence, un coût d'achat relativement élevé. Cette situation a largement contribué au fait que les redresseurs n'ont jamais connu une popularité égale aux services qu'ils pouvaient rendre. Certains appareils plus simples tels les chambres claires (Sketchmaster) ont été fabriqués afin d'obvier à cette situation. Même si les chambres claires sont toujours utilisées intensivement dans certains domaines comme la foresterie, elles ne rencontrent pas les conditions minimales d'optique et de géométrie essentielles à un redressement rigoureux (condition des lentilles de Newton, condition de Scheimpflug, etc...).

Avec la popularité grandissante de l'imagerie numérique et le besoin de plus en plus fréquent de superposer des cartes numériques sur des images du même territoire, on assiste à un regain d'intérêt pour le redressement. Parallèlement à cette situation, les outils d'acquisition d'images numériques ont subi une évolution si rapide qu'ils compétitionnent maintenant avec les capteurs analogiques courants. Par exemple, les numériseurs à balayage, communément appelés "scanners", permettent maintenant de créer des images dont la résolution peut permettre de pointés équivalents à ceux réalisés sur des photographies à l'aide d'appareils photogrammétriques conventionnels. De même, les caméras numériques peuvent dans plusieurs cas de photogrammétrie à courte distance remplacer avantageusement les caméras avec film. Toutes ces images étant sous forme numérique, leur redressement se réalise naturellement de façon totalement numérique. La mathématique décrivant la géométrie projective étant bien connue, de nombreux logiciels de redressement, appelés dans certain cas logiciel de corrections géométriques, sont présentement disponibles. De ce fait, toutes les contraintes mécaniques et optiques sont éliminées sans compter que le coût du logiciel de redressement ne représente qu'une infime partie du prix des redresseurs analogiques.

Devant cet engouement pour les nouveaux logiciels de redressement, cet article présente les différents critères et options que ces redresseurs numériques doivent satisfaire pour rencontrer les besoins des photogrammètres.

2. LOGICIEL DE REDRESSEMENT

Les logiciels de redressement permettent tous de corriger l'effet de l'inclinaison du plan de la photographie. Certains logiciels de redressement différentiel permettent en plus de corriger l'effet du relief. Dans les deux cas, ces programmes construisent une image synthétique ayant une échelle constante à partir de l'image originale et d'une série de points d'appui sur le terrain. Afin de rendre l'opération de redressement facile, un logiciel de redressement doit permettre, en plus de l'affichage et de la manipulation de l'image à corriger, certaines opérations de base comme le pointé, la saisie des coordonnées-image et l'interaction avec une base de données de coordonnées terrain. Les grandes étapes d'une opération de redressement numérique sont illustrées à la figure 1. Chacune d'elle fait l'objet d'explications détaillées dans les sous-sections qui suivent.

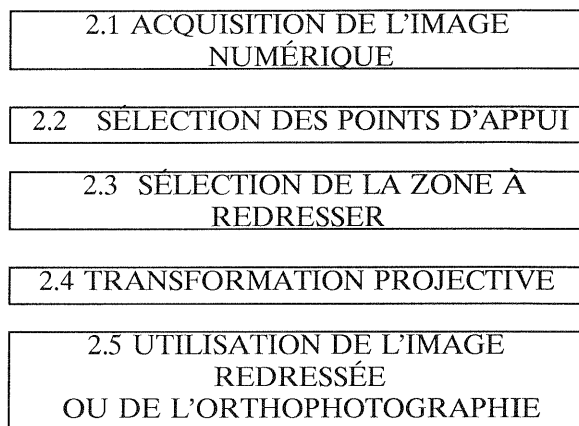


Figure 1. Étapes d'un redressement numérique

2.1 Acquisition de l'image numérique.

Tout le procédé de redressement étant numérique, on se doit tout d'abord de disposer d'images numériques, c'est-à-dire d'images sous forme de matrices de pixels. Les pixels sont représentés sous forme de tons de gris ou de couleurs. En noir et blanc, ces pixels possèdent des tons de gris s'échelonnant généralement sur 256 niveaux. Il existe deux moyens de produire l'image originale sous cette forme, soit la numérisation d'une photographie existante avec un numériseur à balayage ("scanner") ou l'utilisation de senseurs numériques pour capter directement la scène sous forme numérique.

Bien que la logique voudrait que l'on capte directement l'information visuelle sous forme numérique sans passer par un support analogique comme le film, des considérations technologiques font en sorte qu'il est souvent préférable de numériser une photographie prise de façon conventionnelle. En effet, la dimension réduite des senseurs et le nombre limité de pixels du capteur entraînent une échelle photographique souvent trop petite lorsque l'on veut photographier la totalité d'un objet qui se trouve alors à une grande distance. Dans ce cas, la dimension d'un pixel à l'échelle objet devient trop grande.

Les numériseurs à balayage quant à eux ont connu un développement technologique si important qu'ils représentent maintenant des outils de mesures au même titre que les comparateurs photogrammétriques usuels. En fait, ils supportent maintenant le fardeau mécanique avec lequel les appareils de mesures photogrammétriques devaient composer. On peut évaluer les qualités d'un scanner selon différents

critères dont la résolution des images produites, la fidélité et la précision métrique du scanner, la versatilité du logiciel d'accompagnement et la capacité de fonctionner en mode réflectance (pour des photographies sur papier) ou transmittance (pour des photographies sur film). Afin d'assurer le caractère métrique des images fournies par un scanner, le calibrage de ce dernier doit être réalisé. Comme pour un comparateur, on utilise une grille d'étalonnage précalibrée.

Une fois l'image acquise, l'affichage de cette dernière doit se faire par une carte graphique qui respecte le plus possible l'échelle de gris ou de couleurs retenue lors de la numérisation. En noir et blanc, un minimum de 64 tons de gris est nécessaire pour assurer une bonne qualité d'image (Gonzalez, 1987). Même si pour une carte graphique donnée, l'échelle de gris des images est réduite de 256 niveaux à 64, le redressement doit quant à lui considérer l'échelle de gris originale.

On doit également favoriser les cartes graphiques possédant le plus grand nombre de lignes et de colonnes possibles avec une palette de couleur d'au moins 256 couleurs. Ainsi une plus grande section d'image apparaît à l'écran réduisant de ce fait le nombre de réaffichages nécessaires. Pour que le pixel ne devienne pas trop petit à l'affichage, on préférera également les écrans de grande dimension.

2.2 Sélection des points d'appui

Que ce soit pour le redressement en 2 ou 3 dimensions, une série de points d'appui terrain est nécessaire afin d'établir les paramètres établissant la relation entre les coordonnées image et celles du système terrain. Le logiciel de redressement doit permettre le pointé sur l'image des points d'appui. L'utilisation d'une souris ou d'une tablette graphique facilite grandement cette tâche. On doit voir à ce que ces points d'appui ne soient pas tous colinéaires et que la surface qu'ils décrivent soit assez grande pour définir adéquatement le ou les plans du terrain à redresser. De plus, les points d'appui devraient idéalement ceinturer la zone de l'image à redresser afin d'éviter l'extrapolation des plans ou surfaces de redressement.

Dans le cas d'un redressement en 3 dimensions, deux avenues sont possibles. En effet, si ce redressement s'effectue à partir d'une seule image accompagnée d'un modèle d'élévation (MNE), il suffit de s'assurer qu'il y ait correspondance entre ce MNE et l'image. Par contre, si le redressement

se réalise à partir de deux images stéréoscopiques, différents pointés seront nécessaires. Du fait que cette approche demande l'orientation complète du couple stéréoscopique, cela sous-entend le pointé de repères de mesures et des points d'appui terrain sur deux images.

2.3 Sélection de la zone à redresser

L'effort de calcul étant relativement important lors d'un redressement, le logiciel doit permettre à l'opérateur de délimiter la zone qu'il désire uniquement redresser. Ceci peut s'effectuer en positionnant des marqueurs indiquant les coins de cette zone. Afin de réduire l'effort de calcul, le programme devra déterminer ensuite la plus petite matrice ou grille-image contenant celle-ci. Dû au temps de calcul, il peut être souhaitable de différer le traitement proprement dit. Ainsi, le programme doit permettre d'effectuer le redressement de plusieurs images ou parties d'entre elles durant des périodes plus propices.

Le logiciel doit également permettre à l'opérateur de fixer l'échelle de l'image redressée ou de l'orthophotographie. Par défaut le logiciel devrait utiliser l'échelle moyenne de l'image calculée à partir des points d'appui.

2.4 Transformation projective

Pour répondre aux attentes des photogrammètres, les logiciels de redressement doivent se baser sur les transformations projectives en 2 ou 3 dimensions. Même si des transformations polynomiales sont souvent utilisées, le fait que la géométrie présente lors de l'acquisition de l'image ne soit pas directement modélisée entraîne une précision souvent inacceptable (Novak, 1992). La transformation projective en deux dimensions transfère l'information présente sur le plan de l'image originale à un autre plan qui correspondrait à une image parfaitement verticale. En terrain relativement plat, elle peut être avantageusement utilisée vue sa simplicité de programmation. Sa forme paramétrique est la suivante (Slama, 1980) :

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1}$$

$$Y = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1}$$

où: X, Y : Position d'un point projeté dans le second plan,
 x, y : Position de ce point dans le premier plan,
 a_1, \dots, a_8 : Paramètres de transformation projective.

Chaque point dont la position est connue dans l'espace-objet et sur l'image apporte donc deux équations à 8 inconnues. Ainsi, 4 points sont nécessaires à l'établissement de la transformation projective en 2 dimensions. Lorsque plus de 4 points sont disponibles, un bon logiciel de redressement doit utiliser la technique de compensation par moindres carrés pour estimer plus précisément les paramètres de la transformation. Le modèle de compensation par variation de paramètres est alors utilisé.

En terrain plus accidenté, la transformation projective en 3 dimensions doit être préférée. Cette dernière fait appel à la condition bien connue de la colinéarité. Elle est de la forme (Slama, 1980):

$$x-x_0 = f \frac{m_{11} [X-X_0] + m_{12} [Y-Y_0] + m_{13} [Z-Z_0]}{m_{31} [X-X_0] + m_{32} [Y-Y_0] + m_{33} [Z-Z_0]}$$

$$y-y_0 = f \frac{m_{21} [X-X_0] + m_{22} [Y-Y_0] + m_{23} [Z-Z_0]}{m_{31} [X-X_0] + m_{32} [Y-Y_0] + m_{33} [Z-Z_0]}$$

où : x,y : coordonnées-image d'un point,
 x_0, y_0 : coordonnées du point principal,
 f : focale de la caméra,
 X_0, Y_0, Z_0 : coordonnées-terrain du centre de perspective,
 X,Y,Z : coordonnées-terrain d'un point,
 $m_{i,j}$: éléments de la matrice de rotation.

L'approche du redressement différentiel ou de l'orthophotographie présuppose la connaissance de la géométrie interne du capteur, sa position et son orientation dans l'espace au moment de la prise de vue. Le logiciel de redressement complet devrait pouvoir déterminer ces paramètres. Bien que plus rigoureux en terrain accidenté, le redressement différentiel requiert une connaissance en photogrammétrie plus poussée que celle requise pour un redressement par simple projection planimétrique. De plus, le temps de calcul est généralement beaucoup plus important.

Afin de ne pas laisser de pixels non-assignés (trous) dans l'image redressée ou dans l'orthophotographie les transformations projectives s'établissent généralement dans le sens indirect, c'est-à-dire à partir des coordonnées de la grille-image corrigée vers les coordonnées de l'image originale. Une fois la position dans l'image originale déterminée, différentes techniques de rééchantillonnage permettent d'interpoler l'intensité ou la couleur du pixel à placer dans la grille corrigée. Parmi ces techniques on retrouve celle du voisin le plus proche, l'interpolation bilinéaire et la convolution cubique (Richards, 1986).

2.5 Utilisation de l'image redressée ou de l'orthophotographie

L'image redressée ou l'orthophoto peut par la suite être utilisée de diverses façons. La première consiste en l'utilisation du logiciel de redressement pour prélever certaines informations comme des coordonnées, des distances ou des surfaces. Également, un logiciel de redressement peut offrir certaines fonctions, plus ou moins sophistiquées, de cartographie qui peuvent dans plusieurs cas satisfaire l'utilisateur. La deuxième façon consiste à importer l'image redressée, de format raster, dans un logiciel spécialement conçu pour la cartographie, rendant ainsi possible la production de vues perspectives ou la vectorisation des détails d'intérêt cartographique. Pour ce faire, l'image produite doit évidemment être de format compatible avec les logiciels de dessin. La troisième façon est l'emploi d'une imprimante à tons de gris ou couleur permettant de produire le document sous forme analogique.

3. TEST PRATIQUE

Cette section présente un exemple de redressement numérique réalisé à l'aide de la transformation projective en 2 dimensions et de la technique d'interpolation du voisin le plus proche. Il a été réalisé sur un simple PC (80386 DX-25 MHz) accompagné d'un scanner de type courant (Microtek Color/gray). L'équipement utilisé totalise un coût d'achat inférieur à 5 000\$.

L'exemple de redressement consiste en une photographie, prise à l'aide d'un simple appareil photographique 35 mm, d'une porte (figure 2). Étant donné le manque de recul, l'angle de vue est d'environ 45 degrés, ce qui donne une variation d'échelle de 1:13 à 1:22. Cette photographie a été numérisée en format TIFF avec une résolution de 300 points par pouce (dpi)

ce qui donne une image d'environ 1150 lignes par 1750 colonnes occupant environ 2 Méga-octets. Les 6 points d'appui du redressement ont été mesurés à ± 3 mm à l'aide d'un simple ruban à mesurer. L'estimation des paramètres de la transformation projective entraîne dans ce cas des résiduelles sur la position image des points d'appui de l'ordre de $\pm 0,5$ pixel.



Figure 2. Image originale non redressée.

Seule une partie d'environ 830 lignes par 1250 colonnes de l'image originale a été sélectionnée pour le redressement. Le temps nécessaire au redressement a été de 9 minutes. L'image redressée occupe un fichier d'environ 1,5 Méga-octets.

Une fois la transformation complétée, l'image redressée a été importée dans le logiciel de cartographie MicroStation d'Intergraph. Pour ce faire, l'image de format TIFF doit être transformée en format DGN. Les figures 3 et 4 présentent respectivement l'image redressée importée en arrière plan dans MicroStation et le résultat de la cartographie numérique. Le temps total requis pour réaliser la carte numérique a été d'environ 30 minutes. Comparativement à un redressement classique, deux avantages sont à souligner. Le premier concerne le niveau d'expertise significativement moindre dans le cas du redressement numérique. En fait, il suffit de pointer à l'écran de l'ordinateur un nombre limité de points d'appui et d'entrer leurs coordonnées

terrain. Le deuxième se rapporte à la compatibilité du produit avec les logiciels de cartographie numérique et les systèmes d'information à référence spatiale (SIRS).

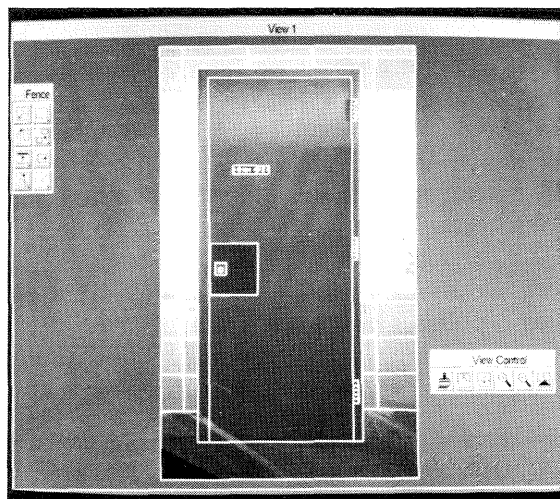


Figure 3. Image redressée.

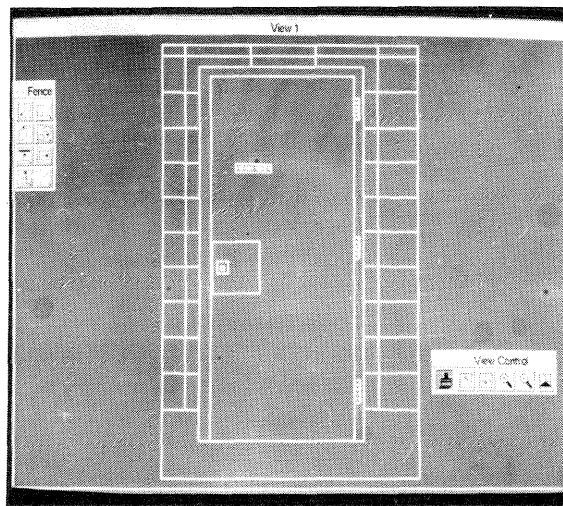


Figure 4. Carte numérique.

Pour évaluer la précision du procédé complet de cartographie à partir d'un simple appareillage, une série de 14 points de vérification a été mesurée sur l'image redressée et comparée avec les coordonnées terrain réelles (voir tableau 1). La précision planimétrique estimée pour ce travail est de 4.5 mm soit $(3.7^2 + 2.6^2)^{1/2}$. Cette valeur correspond à l'erreur de mesure des points d'appui pour le redressement. Pour augmenter cette précision, il aurait suffi: d'augmenter la résolution du balayage, d'augmenter la précision des points d'appui ou d'utiliser une meilleure caméra.

No.	Coord. réelles		Coord. mesurées		Erreurs (mm)	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	ΔX	ΔY
1	0.0	203.0	-4.9	208.3	4.9	-5.3
2	0.0	409.0	-1.4	414.5	1.4	-5.5
3	0.0	613.0	-1.4	614.3	1.4	-1.3
4	0.0	1023.0	-2.0	1020.8	2.0	2.2
5	0.0	1225.0	-4.3	1224.7	4.3	0.3
6	0.0	1432.0	-4.9	1429.2	4.9	2.8
7	0.0	1636.0	1.0	1634.2	-1.0	1.8
8	1632.0	205.0	1633.2	205.9	-1.2	-0.9
9	1630.0	411.0	1631.5	412.8	-1.5	-1.8
10	1634.0	615.0	1634.4	614.9	-0.4	0.1
11	1633.0	1025.0	1629.7	1026.2	3.3	-1.2
12	1635.0	1232.0	1627.3	1229.5	7.7	2.5
13	1638.0	1435.0	1631.5	1433.9	6.5	1.1
14	1637.0	1636.0	1638.0	1638.4	-1.0	-2.4

E.M.Q.: 3.7mm 2.6mm

Tableau 1. Points de vérification

4. CONCLUSION

Sous plusieurs aspects, le redressement numérique se montre avantageux par rapport aux méthodes et appareils conventionnels. En effet, en plus d'éliminer les contraintes mécaniques, il rend accessible à toutes les personnes possédant un micro-ordinateur les opérations de redressement jadis réservées à certains spécialistes en photogrammétrie. Le redressement complètement informatisé permet également de produire un document directement utilisable par les cartographes; ce qui n'était pas le cas avec les documents redressés par méthodes conventionnelles. De plus, la rapide évolution technique des ordinateurs et des capteurs numériques fait en sorte que les principaux obstacles à l'implantation à grande échelle du redressement numérique, soit le temps de calcul et la dimension des fichiers, deviennent de moins en moins importants.

Cependant, comme le présente cet article, les logiciels de redressement doivent rencontrer certains critères théoriques et pratiques pour remplacer avantageusement les redresseurs conventionnels.

5. RÉFÉRENCES

- Gonzalez, R.C. et P. Wintz, 1987. Digital Image Processing. Addison-Wesley, deuxième édition 503p..
- Moffitt, F.H. et E.M. Mikhail, 1980. Photogrammetry. Harper and Row, troisième édition, 648 p..
- Novak, K., 1992. Rectification of Digital imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. LVIII, No. 3, pp.339-344.
- Richards, J.A., 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis, an Introduction. Springer-Verlag, 281 p..
- Slama, C.C., 1980. Manual of Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, quatrième édition, 1056 p..
- Wolf, P., 1983. Elements of photogrammetry. McGraw-Hill, deuxième édition, 628p..