

## GÉOMÉTRIE DE LA SPATIOCARTE : CORRECTION ET VALIDATION

Roland BILLEN et Bernard CORNÉLIS

### I. POSITION DU PROBLÈME

La correction géométrique d'une image ou d'un jeu de données dans la production d'une spatiocarte est l'étape qui assure le passage de la géométrie originelle des données vers une géométrie de référence. Elle nécessite l'application de procédures de correction et de validation.

Ce chapitre commence par une clarification de certains concepts fondamentaux. Dans un premier temps, nous dressons les différents cas de figure qui nécessitent l'application de corrections géométriques dans l'établissement de la spatiocarte. Puis les notions fondamentales de qualité sont abordées. Cette première partie se termine par une présentation des principales sources de déformations géométriques, selon une typologie différenciant les déformations systématiques (liées au système d'enregistrement), des non systématiques (liées à des causes fortuites). Dans la seconde partie, différents mécanismes de correction sont envisagés, tenant compte du type de déformation subie, de la nature du système de prise de vue, etc. La correction ou transformation de l'image vers un système de référence nécessite souvent un rééchantillonnage des images originelles, de sorte qu'une section du chapitre est consacrée aux techniques les plus courantes en la matière. Le processus de correction géométrique n'a de valeur que si l'on sait quantifier la qualité géométrique de la spatiocarte produite. La validation de la qualité, telle qu'elle est présentée ici, repose essentiellement sur la différenciation des techniques d'estimation et des techniques de mesure de la qualité géométrique. Enfin,

la dernière partie aborde les facteurs d'altération de la géométrie indépendants de l'enregistrement.

### A. Les cas d'application

Habituellement, quand on parle de correction géométrique en télédétection, on fait référence au passage de l'image brute, entachée d'erreurs géométriques, vers un système cartographique (local ou global). On parle dans ce cas du passage d'un système image à un système cartographique (Fig. 1). Mais d'autres cas peuvent être rencontrés, comme le changement de système image (pour une fusion), un changement de système cartographique ou la création d'une mosaïque.

La problématique de la correction géométrique peut être réduite à la détermination de la transformation mathématique permettant le passage d'un système de coordonnées (ayant subi les déformations) à un système de référence. Comme nous venons de le signaler, le système de référence peut être varié (image, cartographique, etc.).

Après le passage d'un système de coordonnées image à un système de coordonnées cartographiques, les éléments de la spatiocarte peuvent être repérés suivant des coordonnées cartographiques, souvent propres au pays dans lequel se trouve la zone couverte par la spatiocarte. Si plusieurs éléments doivent être adjoints pour former la spatiocarte (données multisources), il est indispensable qu'ils soient tous dans le même référentiel pour être associés sans ambiguïtés géométriques. Dans le cas du passage d'un système

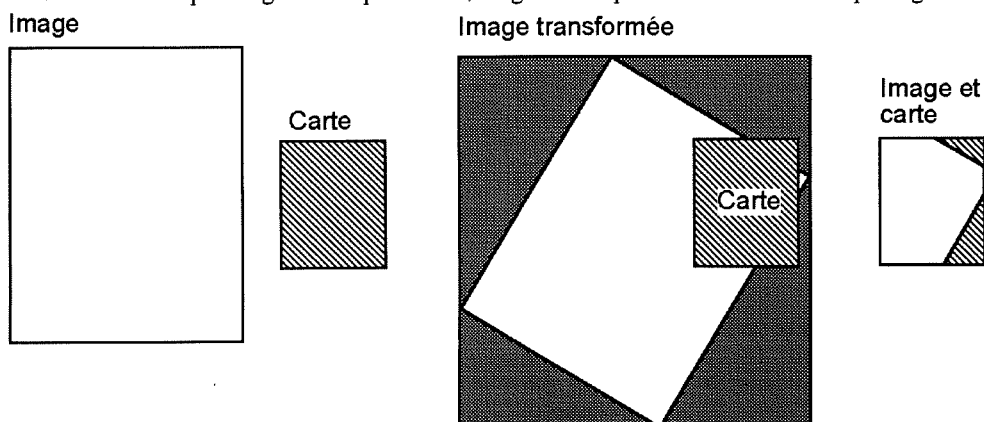


Figure 1. Passage d'un système image à un système cartographique

image à un système cartographique, on parle soit de géocodage, soit de géoréférenciation, selon que la référenciation spatiale s'accompagne ou non d'une transformation géométrique.

Le passage d'un système image à un autre système image peut se justifier pour diverses raisons. Le cas le plus simple est celui où une image est corrigée par rapport à une autre, elle-même géoréférencée ou non. Ainsi, on peut corriger une image par rapport à un fichier image de l'IGN géoréférencé tel qu'une carte numérisée ou une orthophotographie. Il peut s'agir aussi de construire une mosaïque, soit un assemblage d'images permettant d'obtenir une couverture complète de la zone. Cet assemblage s'effectue sur base de points communs entre les images, le géocodage pouvant être réalisé avant ou après l'assemblage. Par contre, lorsqu'il s'agit de fusionner des images censées se superposer sur un même territoire, le géocodage préalable d'au moins une image de référence est indispensable. De plus, lorsque les sources des images à fusionner sont distinctes, toutes les images sont d'abord géocodées séparément et ensuite, soumises à la fusion (T'outin, 1995). Dans ce cas, l'identification de points homologues entre images n'est pas évidente, étant donné les géométries et radiométries différentes des sources. Les méthodes photogrammétriques de géocodage sont d'ailleurs conseillées comme nous le verrons plus loin.

Le passage d'un système de projection cartographique vers un autre n'est pas à proprement parlé une correction géométrique. Néanmoins le principe reste le même, à savoir l'établissement des transformations mathématiques assurant le passage d'un premier système vers un second. Les formules de passage entre les différents systèmes de projection cartographique ne sont pas développées dans cet ouvrage. Néanmoins, le producteur de spatiochartes peut être amené à les utiliser, par exemple pour assurer le passage du système WGS84 d'un levé GPS de points de contrôle, vers un système de projection cartographique local. Il est intéressant de remarquer que, comme dans le cas des corrections géométriques décrit plus loin, deux approches coexistent :

- une première approche pour laquelle les fonctions sont établies et les paramètres connus ;
- une seconde, pour laquelle des fonctions arbitraires sont choisies et les paramètres sont à déterminer par rapport à des données de référence.

## B. La notion de qualité géométrique

Plusieurs facteurs influencent la qualité géométrique des images :

- les caractéristiques du capteur ;
- les déformations lors de l'enregistrement ;
- les méthodes de corrections ;
- les méthodes de rééchantillonnage ;

- les données externes utilisées.

Le reste du chapitre est consacré à leur description, leurs corrections et évaluations. Notons que de nombreux traitements peuvent apparaître à la suite de l'étape de correction géométrique et influencent la qualité finale du document. L'impression bien évidemment, mais aussi les fusions, les classifications, les compositions colorées et les mosaïques.

Avant toute chose, il est nécessaire de poser clairement le problème de la qualité et fixer le vocabulaire commun. Une base de données géographiques n'a pas de valeur si sa qualité, notamment géométrique, n'est pas connue. Il ne suffit pas de corriger une image et passer dans un système cartographique, encore faut-il estimer la qualité du produit obtenu pour pouvoir l'exploiter. Les indicateurs de qualité géométrique sont présentés dans le chapitre précédent, ainsi que certaines normes de qualité cartographique. Plusieurs notions dont la résolution, la précision, l'exactitude, ainsi que l'échelle et la qualité méritent d'être détaillées.

La précision et l'exactitude servent généralement de critères dans les différents standards géographiques et cartographiques. Une base de données géographiques ou une carte est exploitable à une échelle donnée si elle respecte les critères de précision et d'exactitude fixés dans la norme utilisée. Ceci ne veut pas dire qu'une spatiocharte issue d'une base de données exploitable à l'échelle de 1/10 000 sera elle-même exploitable à cette échelle. En effet, les traitements que pourrait subir la base de données (fusion, classification, impression, etc.) influencent sa qualité géométrique. Par conséquent, une validation finale de la qualité géométrique du document sera nécessaire. Cette remarque n'est pas triviale, car bon nombre d'informations sur la qualité, fournies avec des données traitées (par exemple, la carte d'occupation du sol) concernent en réalité la correction géométrique initiale de l'image satellite.

Dans le même ordre d'idée, la relation entre la précision et la résolution n'est pas directe. Rappelons brièvement la notion élémentaire de champ de vision

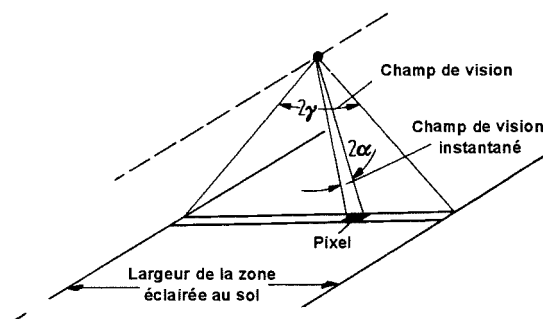


Figure 2. Champ de vision et champ de vision instantané (d'après Richards, 1986)

*ield of view : FOV*) et de champs de vision instantané (*instantaneous field of view : IFOV*) (Fig. 2). Le champ de vision est l'angle, de part et d'autre du nadir, sous lequel les données sont enregistrées. La taille de ce champ varie d'un vecteur d'acquisition à l'autre (enregistrement aéroporté : FOV de 70 à 90 ° ; Landsat 5 : FOV de 15 °). Si ce champ est grand, des distorsions importantes dans la géométrie de l'image peuvent se présenter aux bords de l'enregistrement.

Le champ de vision instantané correspond à l'intersection de la surface terrestre avec l'angle solide ayant le capteur pour sommet. Il est constant pour les scanners spatiaux et aéroportés et il détermine l'aire de la surface terrestre qui est vue à une altitude donnée, à un moment particulier. La taille de cette aire est déterminée en multipliant l'*IFOV* par la distance du sol au senseur. Cette aire élémentaire détermine la résolution spatiale (géométrique) maximale du senseur. Dans le cas de clichés photographiques, la prise de vue est quasi instantanée et sa modélisation est connue (loi de la perspective). Il est donc envisageable, si la correction est optimale, d'obtenir une précision qui soit de l'ordre de la résolution, c'est-à-dire de la taille du pixel, voire du sub-pixel si la photographie est numérisée. Par contre, la modélisation des prises de vue satellite est souvent beaucoup plus complexe et n'est pas toujours totalement maîtrisée. Ainsi, malgré une résolution de 1 m, la précision annoncée pour les images Ikonos rectifiées géométriquement varie de 4 m dans le meilleur des cas, à 50 m dans le cas le plus défavorable (Space Imaging, 2000).

### C. Les sources des déformations géométriques

Les sources des déformations géométriques qui affectent les images et les photographies aériennes sont nombreuses et de divers types. Le traitement des déformations géométriques et la connaissance de leurs sources se révèlent d'une importance capitale dans tous les processus de télédétection. Ces sujets sont traités dans bon nombre de manuels, tant en télédétection (Richards, 1986 ; Lauer, 1994 ; Wilmet, 1996), qu'en photogrammétrie (Krauss, 1993, 1997). L'objectif de cette partie du chapitre est de dresser une typologie des déformations géométriques. Cette typologie différencie les déformations systématiques, c'est-à-dire liées au système d'enregistrement, des déformations non systématiques dues à des causes fortuites. Les données de télédétection sont divisées en deux catégories, les photographies et les images. Cette division est à l'heure actuelle toujours pertinente car la majorité des photographies sont prises à relativement grande échelle, alors que les images sont généralement prises à des échelles plus petites. Mais il faut être conscient que les nouveaux capteurs attendus pour les prochaines années vont assurer un continuum géométrique entre les différents modes d'acquisition de données (Rongxing, 1998 ; Rongxing et al., 2000).

#### 1. Les déformations systématiques

Les déformations systématiques des images satellite sont liées au système d'enregistrement et sont habituellement corrigées par le producteur de données de façon automatique (cf. § II). Elles sont dues principalement à la rotation de la Terre, à l'inclinaison de l'orbite par rapport à la direction nord-sud, à l'angle de balayage, à l'obliquité des lignes de balayage par rapport à la ligne nadirale, à la vitesse de balayage du miroir oscillant (Wilmet, 1996).

- Les effets de la rotation de la Terre : les capteurs linéaires (*line scan sensor*), tels que Landsat MSS et TM, NOAA AVHRR, ainsi que les scanners à balayage (SPOT) ont besoin d'un certain temps pour enregistrer une scène. Durant ce laps de temps, le mouvement de rotation de la Terre d'ouest en est induit un déplacement relatif en longitude dans l'image. Ce déplacement affecte de proche en proche les lignes méridionales de la scène par rapport aux lignes septentrionales. Ceci a pour effet de transformer l'image carrée de l'enregistrement en un parallélogramme. Pour éliminer cette déformation, il est nécessaire de faire subir à l'image une rotation inverse, soit vers l'ouest et de même amplitude. La rotation est fonction des vitesses relatives du satellite et de la Terre, ainsi que de longueur de la scène. Cette déformation est corrigée par le producteur de données.
- La distorsion panoramique : pour rappel, le champ de vision instantané est constant pour les scanners spatiaux et aéroportés. Par conséquent, la taille effective du pixel sur le terrain est plus grande aux extrémités de la ligne scannée qu'au nadir (Fig. 3). Cette distorsion est importante pour les satellites qui ont un grand angle de balayage (par exemple NOAA qui a un angle de balayage d'environ 55,4°). Les dimensions réelles du pixel, largeur et hauteur, peuvent s'exprimer comme suit :

$$L = L_N \sec^2 \theta \quad H = L_N \sec \theta$$

où :

- $L_p$  : largeur du pixel au nadir ;
- $L_p$  : largeur du pixel à un angle  $\theta$  du nadir ;
- $H_p$  : hauteur du pixel à un angle  $\theta$  du nadir

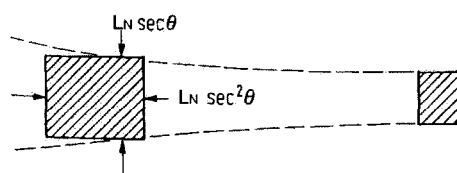


Figure 3. Évolution de la taille effective des pixels le long de la ligne scannée (d'après Richards, 1986)

- Le gauchissement des lignes de balayage (*scan skew*) : les scanners linéaires mécaniques (*mechanical line scanner*) équipant par exemple Landsat MSS et TM, enregistrent la surface terrestre par balayage le long de la ligne nadirale. Cet enregistrement prend un certain temps, pendant lequel le mouvement du satellite sur son orbite génère une distorsion oblique de la ligne balayée par rapport à la ligne nadirale. Par exemple, le temps nécessaire pour enregistrer une ligne scannée de données Landsat MSS est de 33 ms (Richards, 1986). Pendant ce temps, le satellite a avancé de 213 m sur son orbite, et la fin de la ligne enregistrée est plus en avant que son début. Ce problème était corrigé a posteriori avec l'ancienne génération Landsat, mais il est désormais compensé pendant l'enregistrement. Ceci est possible sur le capteur TM grâce à un jeu de miroirs commandé par le moniteur d'angle de balayage. Ce correcteur imprime une rotation progressive à la ligne observée de manière à éviter les superpositions ou les lacunes entre les lignes successives (Wilmet, 1996).

Dans le cas des photographies aériennes, le principal type de déformation géométrique systématique affectant le processus de prise de vue photographique est dû au système de lentilles. Pour corriger ces erreurs, le fabricant du système fournit des abaques de corrections, inclus dans le certificat de calibration, soit des valeurs correctives généralement données suivant les directions principales (diagonales et médianes). Un autre type de déformation qui peut être qualifié de systématique est dû à la numérisation ou scannage, opération requise dans le processus de réalisation de la spatio-carte envisagé dans cet ouvrage. Il faut introduire une distinction fondamentale entre les scanners professionnels (photogrammétriques) et les scanners de bureaux. Les premiers sont spécialement conçus pour numériser des photographies pour un traitement photogrammétrique. Si le producteur de la spatio-carte est amené à utiliser un scanner de bureau, il doit craindre une détérioration à la fois géométrique et radiométrique des documents. Du point de vue géométrique, les déformations engendrées peuvent être mises en évidence en employant une grille calibrée dont on compare la position des nœuds sur le film et sur l'image scannée. À partir de là, un système de correction peut être envisagé. Le lecteur intéressé se référera utilement aux travaux de Baltsavias (1994, 1996 a, 1996 b).

**2. Les déformations non systématiques**

Dans le cas de l'imagerie satellitaire, les déformations non systématiques sont d'abord liées à des mouvements incontrôlés du satellite par rapport à sa ligne orbitale et à la verticale du lieu, et aussi à des variations d'altitude pendant l'enregistrement. Ces déformations sont corrigées habituellement par l'utilisateur et nécessitent la connaissance de points d'appuis ou de contrôle. Il est en effet malaisé dans la plupart des cas d'apporter des corrections automatiques dans la mesure où ces déformations n'ont pas une expression mathématique simple. La figure 4 reprend les différents types de déformations dues aux variations en altitude et en attitude du satellite, ainsi qu'aux variations de la vitesse de balayage et de la vitesse de déplacement du satellite.

De même, dans le cas des photographies aériennes ou satellite, les déformations non systématiques sont liées essentiellement à des mouvements incontrôlés de la plate-forme. Les types de déformations sont identiques, à la différence qu'il n'y a pas d'influence de la vitesse de balayage, l'acquisition étant quasi instantanée sur le film photographique.

**II. LES CORRECTIONS DES DÉFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES**

La relation générale entre les coordonnées de l'image brute et les coordonnées de l'image corrigée d'un point peut s'écrire de la manière suivante.

$$\begin{aligned} u &= f(x, y) \\ v &= g(x, y) \end{aligned} \tag{1}$$

où :

*u* et *v* : coordonnées (ligne, colonne) du pixel dans l'image ;

*x* et *y* : coordonnées du point correspondant dans le système de coordonnées de l'image corrigée ;

*f* et *g* : fonctions mathématiques qui assurent le passage d'un système à l'autre.

À grande échelle et/ou en région de relief accidenté, la prise en compte de la troisième dimension nécessite une généralisation des équations [1]. Dès lors, la modélisation géométrique consiste à trouver les paramètres de la transformation mathématique permettant de passer des coordonnées (*u, v*) d'un élément dans l'image aux coordonnées (*X, Y, Z*) du

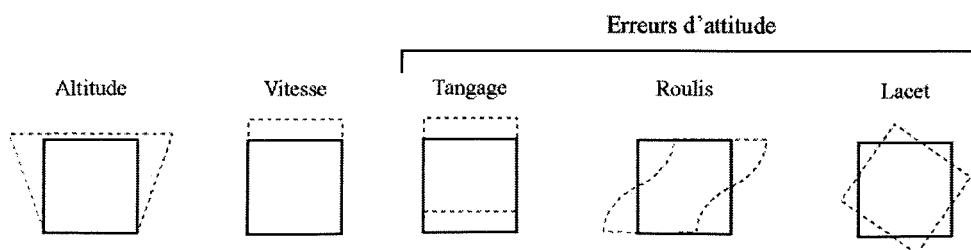


Figure 4. Déformations non systématiques de l'image

point correspondant sur le terrain.

$$u = f(X, Y, Z)$$

$$v = g(X, Y, Z)$$

La problématique de la correction géométrique se résume à l'établissement de ces fonctions  $f$  et  $g$ . Deux cas de figure se présentent, selon que ces fonctions sont connues ou non a priori (Richards, 1986 ; Folving et Denègre, 1994 ; Wilmet, 1996). Dans le premier cas, connaissant les fonctions et les paramètres à appliquer, il est possible de corriger directement l'image. Généralement, la correction des déformations systématiques suit cette logique. Dans le deuxième cas, des fonctions mathématiques arbitraires sont utilisées et leurs paramètres déterminés grâce à des données de référence. Cette méthode est généralement employée pour les déformations non systématiques. Habituellement, les deux méthodes sont combinées, suivant un schéma de correction consistant à modéliser et corriger les déformations systématiques (par les producteurs), puis à corriger par des fonctions mathématiques arbitraires les erreurs non systématiques (par l'utilisateur). Cependant, depuis quelques années, la problématique de la correction géométrique a évolué suite au développement de la photogrammétrie digitale et de la photogrammétrie satellitaire (Toutin, 1996). Bien que les traitements photogrammétriques s'apparentent au cas des fonctions de transformation connues, elles font l'objet d'une partie distincte vu leur relative complexité.

#### A. Fonctions de transformation connues

Certaines déformations qui affectent la géométrie de l'image sont connues et peuvent être modélisées. Les fonctions  $f$  et  $g$  du système d'équations [1] peuvent être formulées de façon explicite. À titre d'exemple, nous présentons la correction des déformations dues à la rotation de la Terre.

Le principe consiste à opérer un déplacement des pixels vers la gauche, en fonction de la ligne sur laquelle ils se trouvent. La position des lignes n'est pas affectée. Considérant les résultats développés dans l'étude des effets de la rotation de la Terre, la correction peut être représentée par le produit matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

D'autres déformations systématiques peuvent être corrigées suivant ce type de méthode, telles que la correction du gisement de la ligne nadirale, la correction de la distorsion panoramique, etc. Ces résolutions sont abordées dans de nombreux ouvrages spécialisés.

#### B. Fonctions de transformation arbitraires - transformations polynomiales

Il est possible de corriger la géométrie de l'image sans connaître tout ou partie des sources de déformations. Les fonctions  $f$  et  $g$  sont remplacées par des fonctions arbitraires, le plus souvent des fonctions polynomiales. La détermination des paramètres de ces relations nécessite la connaissance d'une série de données de référence, des points de contrôle, ou amers, issus de sources documentaires (cartes, base de données) ou d'un levé spécifique (GPS, télémètre, etc.). On peut diviser le problème en deux catégories selon que les fonctions s'appliquent à la totalité ou à des parties de l'image.

##### 1. Fonctions appliquées à la totalité de l'image

Les fonctions de transformation  $f$  et  $g$  peuvent être assimilées à des fonctions polynomiales généralement du premier, deuxième, voire du troisième ordre. Une transformation polynomiale de degré  $n$  à deux variables peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \\ v &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i y^j \end{aligned} \quad [2]$$

$$0 \leq i + j \leq n$$

où :

- $u, v$  : les coordonnées dans le système image ;
- $x, y$  : les coordonnées dans le système de référence ;
- $i, j$  : les degrés du polynôme en  $x$  et en  $y$  ;
- $a_{ij}, b_{ij}$  : les coefficients de la transformation.

Pour un ordre  $n$  donné, il y a  $2N$  coefficients à déterminer où  $N$  est donné par :

$$N = C_{n+2}^2 = \frac{(n+2)(n+1)}{2}$$

Par exemple, une transformation de degré 1 comprend 3 coefficients par relation, c'est-à-dire 6 en tout. Pour une transformation de degré 5, il y a 42 coefficients. Il est rare d'envisager des transformations polynomiales d'ordre supérieur à 3. La transformation la plus courante est celle du premier ordre ou affine :

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

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

où :  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  et  $b_2$  sont les coefficients de la transformation.

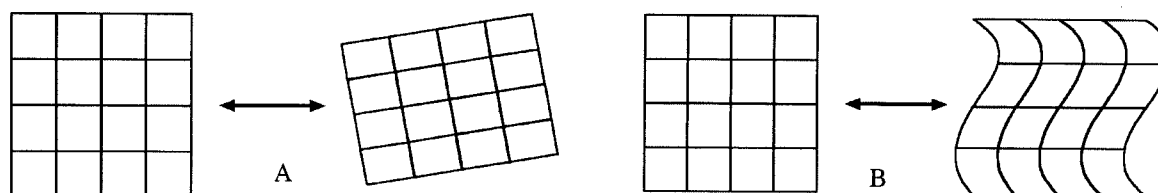


Figure 5. Transformations affine (A) et polynomiale (B)



Figure 6. Transformation affine appliquée à une image SPOT de la région de Liège

Les coordonnées des points dans le système image sont exprimées comme étant des combinaisons linéaires des coordonnées des points correspondants dans le système de référence. Cette transformation permet de tenir compte d'une désorientation entre les systèmes d'axes, de deux translations, de deux facteurs d'échelle et de deux facteurs de glissement distincts selon les axes. Elle est très souvent utilisée pour les zones à faible énergie de relief. La correction affine nécessite 3 points (6 coordonnées) connus aussi bien dans le système de coordonnées images que dans le système de coordonnées de référence. Dans la pratique on travaille avec des données surabondantes, ce qui permet une résolution par la méthode des moindres carrés. Le type, la source et le nombre de ces points sont discutés plus loin.

## 2. Fonctions appliquées à une partie de l'image

Plutôt que de travailler sur la totalité de l'image, il est possible de la diviser en plusieurs parties et déterminer des fonctions de transformations  $f$  et  $g$  pour chaque partie. La méthode la plus couramment employée, et certainement la plus adéquate, est basée sur l'établissement d'un réseau irrégulier de triangles (en anglais TIN pour *triangulated irregular network*) (voir notamment Cornélis et Pattyn, 1997). Le principe est

de définir un ensemble de triangles dont les sommets sont les points de contrôle et de déterminer pour chaque triangle les coefficients de la fonction de transformation.

En partant d'un ensemble de points dont la distribution est quelconque, dans notre cas les points de contrôle, de nombreux arrangements de triangles sont possibles. La triangulation de Delaunay a la particularité d'être constituée de triangles les plus équilatéraux possibles, c'est-à-dire évitant au maximum les angles aigus. La triangulation de Delaunay satisfait en fait au critère angulaire qualifié de « max-min » qui peut être exprimé de la manière suivante : parmi les deux partitions en triangles d'un quadrilatère convexe, la partition de Delaunay est celle qui détermine le plus grand angle minimum, parmi les six angles internes (Fig. 7). Un autre critère de construction d'un triangle de Delaunay consiste à retenir trois sommets tels que le cercle qui les circonscrit ne contient pas d'autre sommet. Grâce à ces propriétés, la triangulation de Delaunay est considérée comme optimale pour l'interpolation. Il existe plusieurs algorithmes pour construire cette triangulation en partant d'un ensemble de points donné, mais leur développement sort du cadre de cette ouvrage (voir par exemple, Okabe et al., 1992).

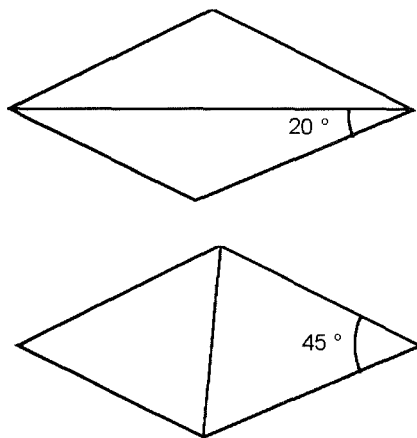


Figure 7. Triangulation de Delaunay : seule la partition du bas répond aux critères de Delaunay

Disposant d'une triangulation de Delaunay construite sur base d'une série de points de contrôle, il est possible de transformer n'importe quel point de l'image brute en localisant le triangle dans lequel il se trouve. La stratégie consiste dans un premier temps à déterminer les paramètres de la transformation mathématique (dans le cas de trois points, il s'agit d'une transformation affine) des sommets du triangle depuis le système de coordonnées de l'image vers le système de coordonnées des points de contrôle.

$$X_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3y_1$$

$$X_2 = a_1 + a_2x_2 + a_3y_2$$

$$X_3 = a_1 + a_2x_3 + a_3y_3$$

$$Y_1 = b_1 + b_2x_1 + b_3y_1$$

$$Y_2 = b_1 + b_2x_2 + b_3y_2$$

$$Y_3 = b_1 + b_2x_3 + b_3y_3$$

où :

$x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$  : les coordonnées initiales (images) des sommets du triangle ;

$X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3$  : les coordonnées correspondantes dans le système cartographique de référence.

Après résolution de ce système de six équations à six inconnues, on disposera ainsi des paramètres de transformation ( $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ ) applicables à l'intérieur du triangle. Tout point  $i$  se trouvant dans le triangle pourra être transformé en utilisant :

$$X_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i$$

$$Y_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i$$

Cette méthode peut être particulièrement intéressante si l'on dispose de nombreux points de contrôle et s'ils sont répartis de façon homogène sur la zone d'intérêt. Ces points de contrôle seront donc exactement cartographiés. Le problème majeur lié à cette méthode

vient de ce qu'aucune extrapolation n'est possible pour des points qui seraient situés hors de l'aire couverte par la triangulation de Delaunay.

### 3. Transformations perspectives

Les fonctions de transformation  $f$  et  $g$  peuvent aussi être assimilées à des transformations perspectives, obéissant aux lois des projections centrales et des rotations dans l'espace. Le passage du système de coordonnées image au système de coordonnées de référence est traduit par les relations suivantes :

$$x = \frac{a_1u + a_2v + a_3}{c_1u + c_2v + 1} \quad y = \frac{b_1u + b_2v + b_3}{c_1u + c_2v + 1}$$

où  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1$  et  $c_2$  sont les coefficients de la transformation perspective.

Ce système d'équations correspond au cas particulier où il y a projection sur un plan parallèle au plan  $(x,y)$ . Le développement du cas général ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage. Retenons simplement que cette transformation nécessite la détermination de huit paramètres. Quatre points de contrôle sont donc nécessaires à leur détermination. Comme dans les précédents, on travaille dans la pratique avec des données surabondantes et la résolution du système se fait par moindres carrés. Ces paramètres traduisent l'attitude dans l'espace de la prise de vue et rend compte notamment des angles de rotation entre, d'une part, les axes du système image et, d'autre part, ceux du système de référence.

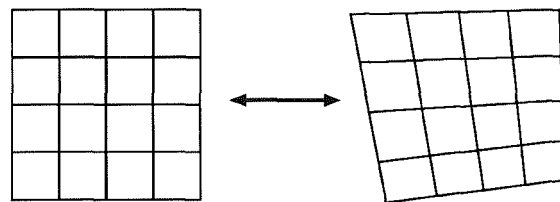


Figure 8. Transformation perspective

### C. Traitements photogrammétriques - Orthorectification

Les techniques photogrammétriques sont employées pour les photographies aériennes depuis des décennies. Cette discipline a connu ces quinze dernières années deux évolutions majeures : d'une part, le passage à la photogrammétrie numérique et, d'autre part, la naissance de la photogrammétrie satellitaire. Une description complète des traitements photogrammétriques est évidemment hors de propos. Le lecteur intéressé pourra se référer à des ouvrages récents (Krauss, 1993, 1997 ; Schenk, 1999). Le concept général est de modéliser la géométrie de la prise de vue dans son ensemble, ce qui nécessite la connaissance de divers paramètres. Le but de cette



partie est de présenter la philosophie générale des traitements photogrammétriques, afin que le lecteur puisse utiliser en connaissance de cause les produits logiciels existants.

### 1. Les photographies aériennes

Le traitement photogrammétrique est généralement appliqué à des photographies aériennes. Ce traitement peut être résumé à deux opérations (Billen, 1997). La première est l'orientation interne de la photographie, qui consiste en la reconstruction de la géométrie interne des gerbes perspectives dans le système de projection. Elle est déterminée par les éléments suivants, figurant dans le certificat de calibration de la caméra fourni par le constructeur :

- la focale de l'appareil de prise de vue ( $F$ ) ;
- la position du point principal dans le plan de l'image ;
- les caractéristiques des distorsions dues au système de lentilles.

La deuxième opération est l'orientation externe de la photographie. Elle reconstitue la position de la caméra telle qu'elle existait dans l'espace au moment de la prise de vue. Elle nécessite la connaissance des trois coordonnées du centre optique de la caméra ( $X_0$ ,  $Y_0$  et  $Z_0$ ) dans le système général envisagé (par exemple, le système cartographique local) et les trois angles de rotation définissant la direction de l'axe optique ( $\omega$ ,  $\phi$  et  $\kappa$ ). Ces paramètres doivent être déterminés en utilisant des points de contrôle au sol. Notons que le développement des systèmes embarqués (GPS et plate-forme inertielle) permettent d'obtenir ces paramètres directement. Les solutions combinant systèmes embarqués et points de contrôle au sol semblent les plus prometteuses.

Lorsque ces deux opérations sont réalisées, il est possible de passer à l'étape d'orthorectification. Elle consiste à éliminer les distorsions introduites par le relief. Ces distorsions sont représentées par l'équation [3] et la figure 9. La position d'un point sur la photographie dépend non seulement de sa position planimétrique sur le terrain, de l'échelle de la photo et de la focale de la caméra, mais aussi de sa position en altimétrie. Il faut donc éliminer l'effet du relief si l'on veut se trouver dans un repère orthogonal semblable à celui des cartes et levés topographiques. Pour ce faire, il faut disposer d'une modèle approché du relief de la zone, soit un modèle numérique d'élévation (MNÉ).

$$\Delta Q = \Delta Z \frac{Q}{c \cdot m_b} \quad [3]$$

où :

- $\Delta Q$  et  $Q$  : déplacement radial et position radiale ;
- $\Delta R$  et  $\Delta Z$  : déplacements radial et altimétrique, dans le modèle terrain par rapport au plan objet ;
- $c$  : distance principale ;
- $1/m_b$  : échelle de l'image.

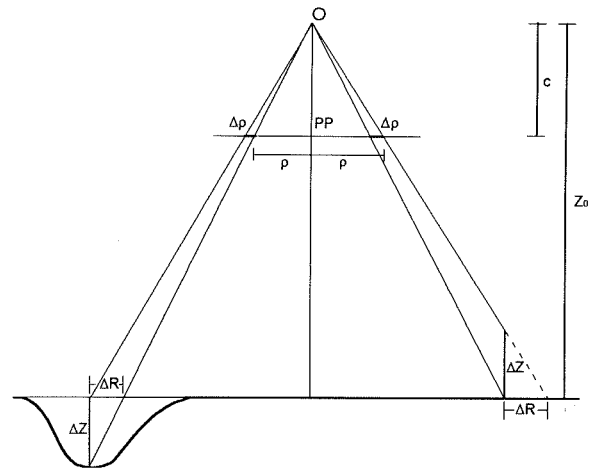


Figure 9. Déplacement radial ( $\Delta Q$ ) de points à l'extérieur du plan objet supposé, photographie parfaitement verticale (d'après Krauss, 1993)

Pratiquement, l'orthorectification est réalisée en trois étapes. La technique employée part de l'image à produire vers l'image d'origine (transformation inverse). Tout d'abord, l'altitude  $z(p)$  de chaque pixel de l'orthoimage  $p$  ( $l$ ,  $c$ ) est calculée par interpolation du MNÉ (Fig. 10 A). À ce stade, le pixel est géoréférencé en  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Ensuite, par application inverse des relations de colinéarité, la position correspondante du pixel sur la photographie est déterminée (Fig. 10 B).

$$\begin{aligned} x' &= f_1(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, F, \phi, \omega, \kappa) \\ y' &= f_2(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, F, \phi, \omega, \kappa) \end{aligned}$$

où :

- $x'$ ,  $y'$  : coordonnées dans le système photographique
- $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  : coordonnées du centre de projection
- $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  : angles de rotation de l'axe optique ;
- $F$  : distance focale.

Il ne reste plus qu'à rechercher le pixel équivalent à ce point sur l'image, en l'occurrence la photographie scannée (Fig. 10 C). Cette dernière opération correspond à l'application inverse des corrections des déformations des lentilles et de l'orientation interne de l'image.

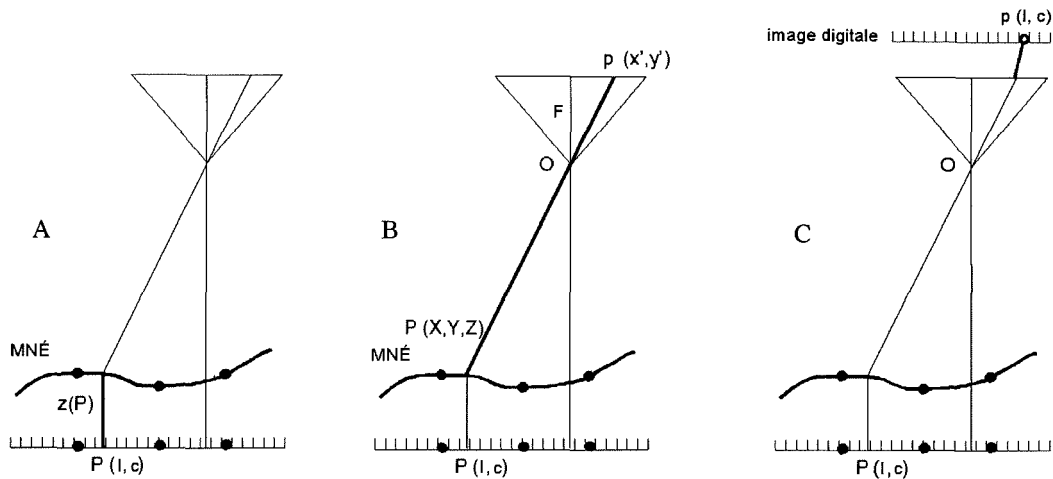
$$\begin{aligned} l &= a_0 + a_1x' + a_2y' \\ c &= b_0 + b_1x' + b_2y' \end{aligned}$$

où :

- $l$ ,  $c$  : coordonnées image ;
- $a_i$ ,  $b_i$  : paramètres de transformation.

L'orthorectification des photographies aériennes est une opération communément préconisée, car seul le cas où le terrain couvert est relativement plat autorise un simple redressement perspectif.





**Figure 10. Principe d'orthorectification**

A. Détermination de l'altitude de chaque point de l'orthoimage. B. Recherche du point correspondant sur la photographie. C. Recherche du point correspondant sur l'image brute.

## 2. Les images satellite

Avec l'avènement des capteurs à haute et très haute résolutions assurant une couverture stéréoscopique, de nouvelles possibilités de traitements géométriques sont apparues. Les techniques photogrammétriques ont été adaptées au traitement des images satellite et permettent à l'heure actuelle d'engendrer des MNÉ et de réaliser des orthorectifications. C'est le satellite SPOT qui, logiquement, fait l'objet du plus grand nombre d'applications de nature photogrammétrique, puisqu'il a été le premier à disposer de la haute résolution et de la stéréoscopie (Renouard, 1991 ; Toutin, 1986, 1995, 1996).

La modélisation des scènes satellitaires est une opération complexe mais constitue une étape essentielle dans l'obtention de produits tels que MNÉ ou orthoimages. Elle repose principalement sur la prise en compte de l'attitude du satellite. On peut considérer que les distorsions sont essentiellement liées à trois composantes du système de prise de vue :

- la plate-forme, avec sa position, sa vitesse et son orientation ;
- le capteur, avec ses angles d'orientation, son temps d'intégration ou son impulsion et son champ de vue instantané ;
- la Terre, avec les paramètres de l'ellipsoïde, approximation du géoïde, et l'altitude du terrain.

Deux approches de modélisation coexistent. La première suit la logique classique de la photogrammétrie. Chaque étape de la modélisation correspond à une étape du traitement photogrammétrique des photographies aériennes. Par exemple, Renouard propose l'extraction d'une carte de disparité correspondant à l'orientation relative, suivie par la modélisation géométrique du capteur et le calage du modèle dans le système de coordonnées de référence qui correspond à l'orientation absolue. Les

effets de chaque élément du système sont corrigés séparément.

La seconde, présente une approche holistique du problème (Toutin, 1986). Cet auteur considère la géométrie totale de prise de vue « plate-forme + capteur + Terre + système cartographique » dans l'évaluation des distorsions et de leurs conséquences. Cette **approche intègre des notions de photogrammétrie, d'orbitographie, de géodésie et de cartographie.**

La modélisation de la méthode photogrammétrique est, on le devine, très complexe et sa programmation se révèle ardue. Récemment, plusieurs logiciels ont proposé **tout ou partie des processus photogrammétriques**, mais rares sont ceux qui permettent le traitement complet sur divers types d'images (capteur optique, radar, etc.). D'autre part, l'acquisition de MNÉ s'avère être une étape importante dans la démarche de l'utilisateur, d'autant que sa précision influence directement celle de l'orthoimage engendrée (Toutin, 1995, 1996). Or, mise à part la numérisation de cartes topographiques, la construction d'un MNÉ par les voies classiques requiert des moyens spécialisés (photogrammétrie aérienne et spatiale, lasérométrie, interférogrammes radar, etc.).

Si les images à traiter sont à petite échelle et/ou si le relief est peu prononcé dans la zone d'intérêt, les corrections polynomiales sont suffisantes. Dans tous les autres cas, il est souhaitable d'orthorectifier les images, si celles-ci le permettent. Malgré l'indiscutable supériorité de la méthode dite photogrammétrique, il reste que la complexité de la modélisation et la disponibilité difficile d'un MNÉ réduisent son usage en matière de correction géométrique des images satellite.

À titre d'exemple, une illustration d'orthoimage est présentée plus loin dans le texte (Fig. 16). Une orthorectification a été réalisée sur une scène SPOT (45-247 du 29 juin 1992) avec le logiciel PCI OrthoEngine. Tout d'abord deux scènes SPOT stéréoscopiques (45-247 du 29 juin 1992 et du 13 octobre 1992) ont été orientées et deux images épipolaires (élimination de la parallaxe en y) ont été générées. Sur base de celles-ci, un MNÉ a été calculé, et a servi à l'orthorectification.

### III. LE RÉÉCHANTILLONNAGE

#### A. Définition

Le rééchantillonnage est l'opération qui consiste à affecter aux pixels de nouvelles valeurs radiométriques **créées durant la correction géométrique** d'une image numérique. Pour ce faire, la méthode utilise les valeurs situées dans le voisinage des pixels homologues de l'image non corrigée. On peut imaginer une transformation directe (T), depuis l'image originale, vers l'image corrigée (Fig. 11 A), mais cette approche présente deux désavantages évidents. D'une part, on n'est pas assuré que tous les pixels de la nouvelle image reçoivent bien une valeur radiométrique. D'autre part, certains pixels de la nouvelle image peuvent, au contraire, être affectés de plusieurs valeurs distinctes. Ces deux problèmes sont

résolus en suivant une approche inverse.

La transformation inverse ( $T^{-1}$ ) consiste à chercher, pour chaque pixel de coordonnées  $(x,y)$  dans l'image corrigée, les coordonnées  $(u,v)$  de la position homologue **dans l'image non corrigée** géométriquement (Fig. 11 B). Tous les pixels de cette dernière ne seront peut-être pas visités par la procédure, mais à l'inverse, le remplissage de la nouvelle image est garanti. Il faut pourtant noter que les coordonnées  $(u,v)$  calculées par la transformation inverse sont obtenues en nombres réels, ce qui signifie qu'elles ne désignent pas un pixel de façon précise, mais plutôt une position relative. C'est au voisinage de cette position dans l'image originale, que la procédure cherche la valeur radiométrique à affecter au pixel homologue de l'image corrigée. Cette recherche peut s'appuyer sur plusieurs méthodes d'interpolation.

#### B. Méthodes d'interpolation

Les différentes méthodes d'interpolation sont des règles décisionnelles qui vont permettre d'affecter à chacun **des pixels de l'image corrigée** géométriquement une valeur radiométrique calculée par interpolation dans le voisinage de la position  $(u,v)$  retournée par la transformation géométrique inverse. Les méthodes d'interpolation diffèrent selon la taille du voisinage choisi (Fig. 12).

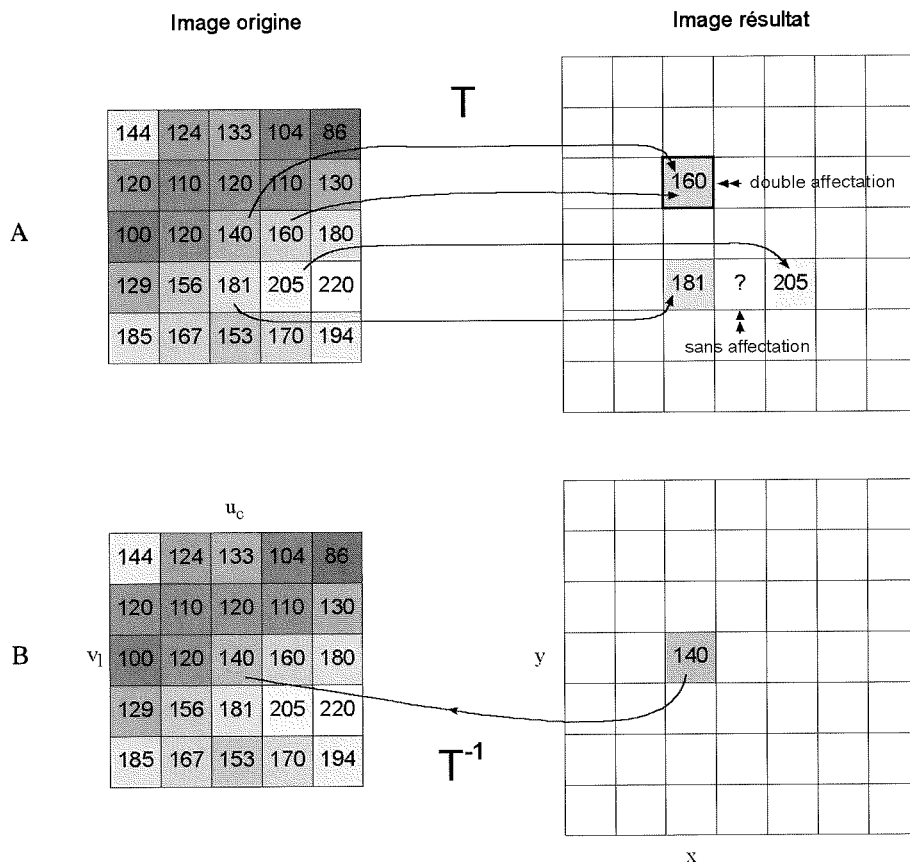
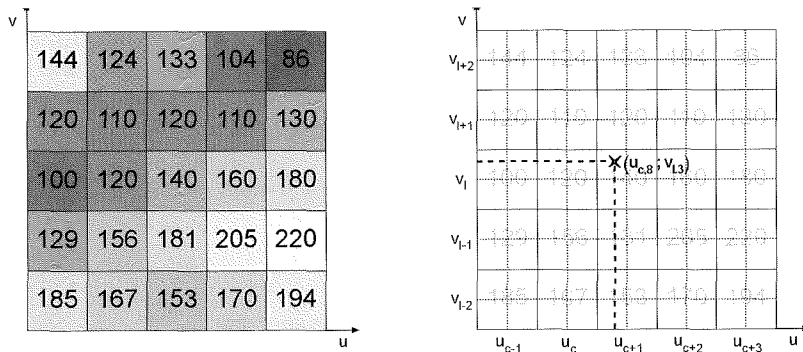
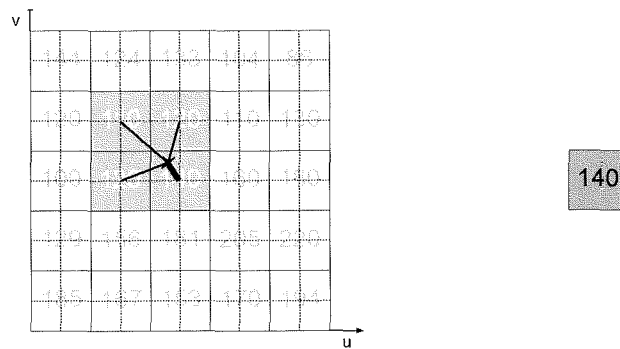


Figure 11. Méthodes (A) directe et (B) inverse de transformation

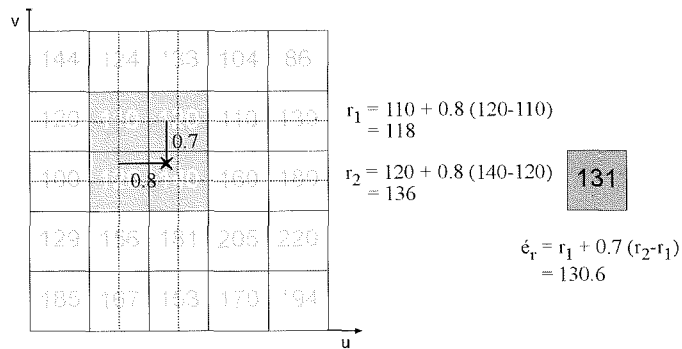


?

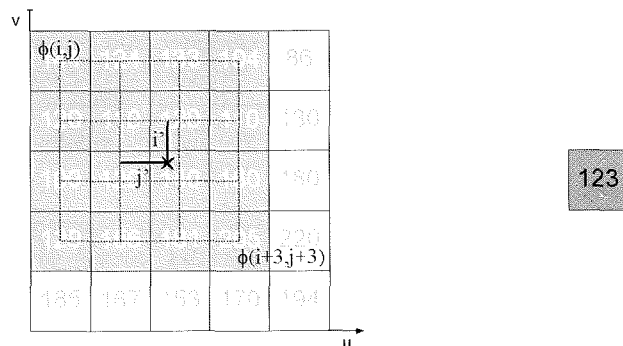
A. Recherche de la valeur affectée au pixel après correction géométrique



B. Cas du rééchantillonnage au plus proche voisin



C. Cas du rééchantillonnage bilinéaire



D. Cas du rééchantillonnage cubique

Figure 12. Les méthodes d'interpolation

### 1. La méthode du plus proche voisin

C'est le cas le plus simple, pour lequel, d'ailleurs, il n'y a pas véritablement d'interpolation. Le voisinage de la position  $(u, v)$  est limité à un seul pixel. Pratiquement, les coordonnées  $(u, v)$  exprimées en nombres réels sont arrondies aux entiers  $(c, l)$  les plus proches, déterminant ainsi les indices de colonne et de ligne d'un pixel de l'image originale. C'est la valeur radiométrique de ce pixel qui est affectée au pixel homologue  $(x, y)$  de l'image corrigée géométriquement. La technique garantit que les valeurs écrites dans l'image corrigée correspondent à des valeurs effectivement présentes dans l'image d'origine. Ce recopiage sans altération peut être jugé nécessaire pour divers traitements réalisés en aval de la correction géométrique tels que les classifications d'images par exemple.

### 2. L'interpolation bilinéaire

Les quatre pixels situés, en ligne et en colonne, de part et d'autre de la position  $(u, v)$  déterminent le voisinage d'interpolation. Dans chaque ligne, on calcule la valeur radiométrique correspondant à l'abscisse  $u$ , par simple interpolation linéaire entre les centres des deux pixels voisins. Puis, en se basant sur ces deux valeurs interpolées, on effectue une nouvelle interpolation sur la verticale d'abscisse  $u$  pour trouver la valeur radiométrique finale à hauteur de  $v$ . Cette valeur est un nombre réel qu'il peut être nécessaire d'arrondir avant de l'affecter au pixel homologue de l'image corrigée. La valeur affectée ne correspond pas, sauf cas fortuit, à une des valeurs radiométriques originales et l'image résultat est lissée, présentant un contraste adouci.

### 3. L'interpolation cubique

Pour l'interpolation cubique, les seize pixels voisins de la position  $(u, v)$  sont utilisés. Dans les quatre lignes successives de ce voisinage, quatre équations polynomiales cubiques sont ajustées en se basant sur les abscisses des centres des pixels et leur valeur radiométrique. Une valeur est interpolée sur la polynomiale de chaque ligne à l'abscisse  $u$ . Un nouvel ajustement polynomial cubique est réalisé entre les quatre valeurs interpolées situées sur la verticale

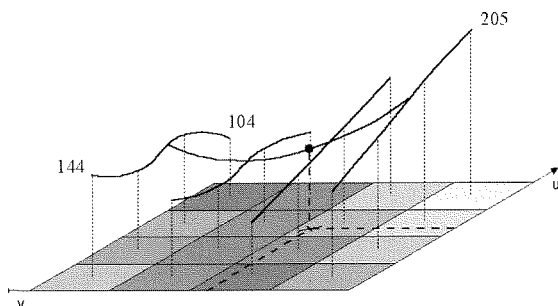


Figure 13. Cas détaillé du rééchantillonnage cubique

d'abscisse  $u$ , et la valeur finale est trouvée le long de cette polynomiale à hauteur de  $v$ . Les détails de la construction sont illustrés à la figure 13. Chaque interpolation peut être transcrite par une simple relation linéaire (Richards, 1986). Le long de chaque ligne, la valeur interpolée en  $u$  est donnée par :

$$\begin{aligned} \phi(i, u) = & u\{u[\phi(i, j+3) - \phi(i, j+2) + \phi(i, j+1) - \phi(i, j)] \\ & + [\phi(i, j+2) - \phi(i, j+3) - 2\phi(i, j+1) + 2\phi(i, j)] \\ & + [\phi(i, j+2) - \phi(i, j)]\} + \phi(i, j+1) \end{aligned}$$

où :

- $i$  : n° de la ligne courante ;
- $j$  : n° de la colonne située à gauche du voisinage ;
- $\phi$  : valeur radiométrique.

Tandis que le long de la verticale d'abscisse  $u$ , la valeur radiométrique finale obtenue à hauteur de  $v$  est donnée par :

$$\begin{aligned} \phi(v, u) = & v\{v[\phi(i+3, u) - \phi(i+2, u) + \phi(i+1, u) - \phi(i, u)] \\ & + [\phi(i+2, u) - \phi(i+3, u) - 2\phi(i+1, u) + 2\phi(i, u)] \\ & + [\phi(i+2, u) - \phi(i, u)]\} + \phi(i+1, u) \end{aligned}$$

où  $i$  vaut cette fois le numéro de la ligne supérieure du voisinage.

## IV. LA VALIDATION GÉOMÉTRIQUE

### A. Position du problème

Un produit géographique tel une spatiocarte doit obligatoirement être accompagné d'une appréciation de sa qualité. Dans ce chapitre, c'est la qualité géométrique du produit qui est au cœur des préoccupations, c'est-à-dire la connaissance des erreurs qui affectent le positionnement planimétrique et altimétrique des éléments de la spatiocarte.

Le processus de correction géométrique est entaché de plusieurs erreurs. Certaines sont inhérentes aux données de départ et d'autres sont introduites lors des traitements. Ces dernières proviennent soit des algorithmes de corrections des déformations géométriques, soit des données externes nécessaires aux corrections. Considérant ces différentes sources d'erreurs, la question est de savoir comment appréhender la qualité géométrique des produits résultants (Fig. 14).

Il existe deux approches pour déterminer l'effet cumulé des erreurs introduites tout au long du processus :

- estimer l'erreur engendrée par le système ;
- mesurer l'erreur engendrée par le système.

Conceptuellement, la première approche est la plus intéressante, car elle permet d'identifier les sources d'erreurs et de quantifier leurs effets. Dans ces conditions, il est possible de cibler l'amélioration du

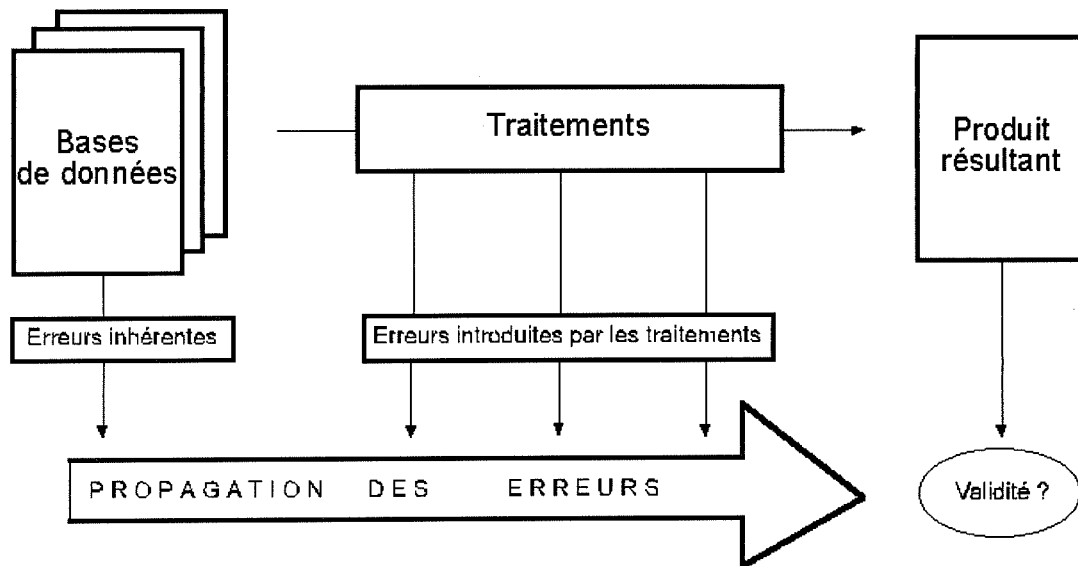


Figure 14. Propagation de l'erreur dans les bases de données géographiques (d'après Tahiri, 1997)

processus sur les sources d'erreurs les plus grandes. Dans la pratique, les erreurs inhérentes aux données de base ne sont pas facilement quantifiables et l'étude de la propagation de ces erreurs sur l'ensemble du processus de correction est relativement ardu. Ceci explique pourquoi la seconde option est généralement choisie.

### B. Estimation de l'erreur

La première approche nécessite une identification détaillée étape par étape de tout le processus. Pour pouvoir estimer l'erreur, il est indispensable d'identifier la contribution de chaque étape sur l'écart-type. Afin de prendre en compte le poids respectif de chaque étape sur l'erreur, il faut recourir aux techniques de propagation de variance, décrites par de nombreux auteurs, notamment Mikhail (1976).

Soit  $Y$  une fonction de  $m$  quantités, chaque quantité étant fonction de  $n$  variables ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) :

$$Y_1 = f_1(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$Y_2 = f_2(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

....

$$Y_m = f_m(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

que l'on note sous forme vectorielle :

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

où ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) sont des variables dont la matrice de covariance est  $\Sigma_{xx}$ . La loi de la propagation des variances-covariances permet de calculer  $\Sigma_{yy}$ , la

matrice de covariance de  $Y$ , et donc obtenir une estimation de l'erreur en fin de processus, par la formule :

$$\Sigma_{yy} = J \Sigma_{xx} J^T$$

où  $J$  est la matrice des dérivées partielles de  $Y$  par rapport aux quantités  $X_i$  ( $J$  est appelée matrice jacobienne).  $\Sigma_{xx}$  est la matrice de covariance des variables  $X_i$ , c'est-à-dire que sa diagonale principale contient les variances des quantités  $X_i$  ( $\sigma_i^2$ ), alors que les covariances entre ces quantités  $X_i$  ( $\sigma_{ij}$ ) se trouvent hors diagonale. Cette matrice est symétrique par rapport à sa diagonale principale.

$$\Sigma_{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \sigma_{23} & \dots & \sigma_{2n} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_3^2 & \dots & \sigma_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \sigma_{n3} & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}$$

Comme indiqué plus haut, cette approche, bien qu'extrêmement puissante, est difficilement applicable dans le cas de la validation de la qualité géométrique des spatiocartes. En effet, il est presque impossible d'estimer efficacement l'influence de chaque étape de la production. Dès lors, les résultats obtenus ne sont pas fiables et ne peuvent tenir lieu d'indicateur. Notons, qu'il peut être intéressant d'obtenir a priori une estimation, même biaisée, de l'erreur. Une étude de propagation simplifiée peut en effet donner des indications importantes, permettant d'exclure certains traitements avant leur mise en œuvre.

### C. Mesure de l'erreur

Dans la deuxième approche, les différentes étapes du processus ne sont pas considérées isolément. Seul le résultat final est pris en compte et comparé à une référence. Dans ce cas, c'est l'erreur moyenne quadratique entre les valeurs observées et celles de référence qui sert d'estimateur. Pour chacun des  $n$  points de test, l'erreur ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) entre les coordonnées « vraies » et les coordonnées mesurées est calculée. Ces valeurs sont utilisées pour déterminer l'erreur moyenne quadratique, par exemple celle sur  $X$  suivant la formule ci-dessous.

$$eqm(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}}$$

#### 1. Points test

Couramment, une erreur moyenne quadratique sur les points de contrôle est donnée comme indicateur de la qualité de l'image corrigée. En réalité, cette *eqm* est souvent sous-estimée car les points de contrôle ne sont pas indépendants des coefficients des transformations mathématiques. Il est préférable d'utiliser une série de points dissociés des points de contrôle et qui ne participent pas à la détermination des paramètres des fonctions de transformation. Le nombre de points test doit être important si l'on veut disposer d'un échantillon statistiquement significatif. Ce nombre varie en fonction du type d'image à corriger mais généralement est supérieur à quinze.

#### 2. Validation croisée

Disposer d'un large échantillon de points, permettant d'utiliser des points de contrôle et des points test distincts n'est pas toujours évident. Si le nombre de points disponibles est juste suffisant à la détermination des coefficients des transformations mathématiques, il est tout de même possible d'en retirer des statistiques non biaisées, en ayant recours à la méthode de

validation croisée. Elle peut être décrite de la manière suivante (Macgwire, 1996). Le premier point est retiré de l'ensemble des points et la transformation géométrique est calculée en utilisant les points restants. Cette transformation est appliquée au premier point et la différence avec sa vraie valeur est calculée. Le premier point est alors replacé dans l'ensemble et le processus est appliqué itérativement à tous les points de l'ensemble. Ceux-ci fournissent donc des résidus indépendants des modèles calculés, ce qui offre une idée plus pertinente de l'exactitude de la correction.

#### 3. Exemple

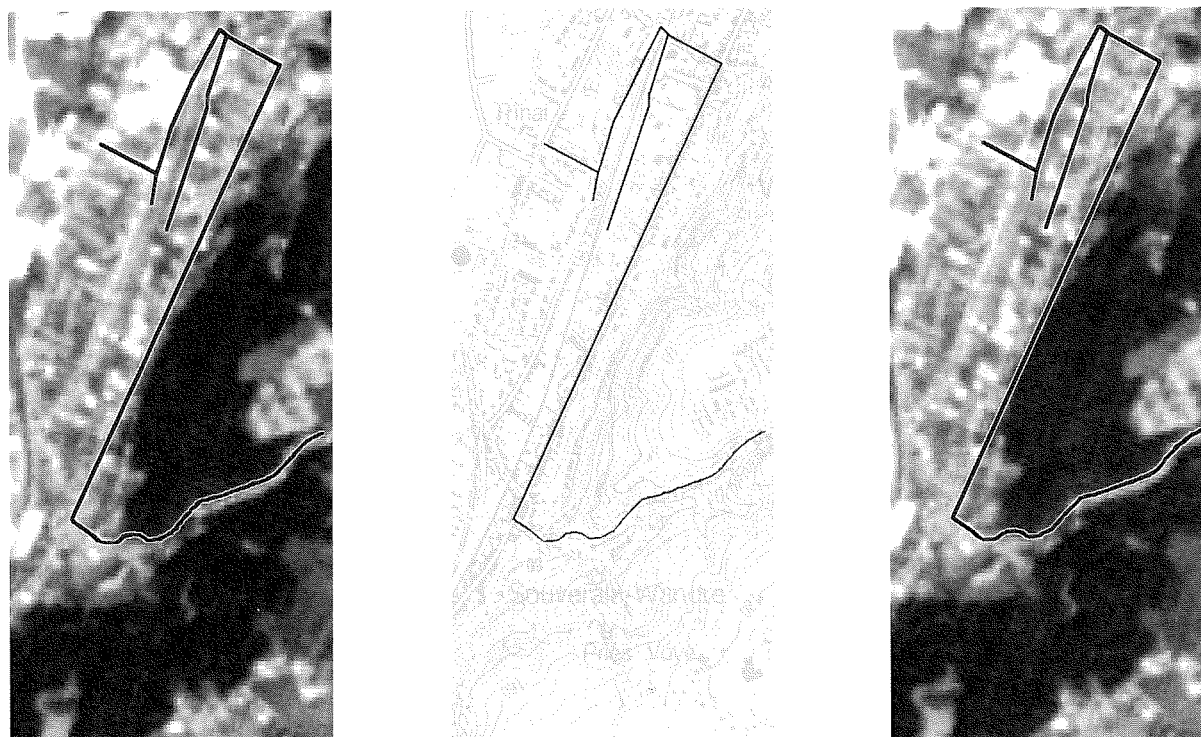
La différence entre les *eqm* calculées sur différents types de points (points de contrôle, validation croisée, points test) est illustrée dans le tableau 1. Ce tableau montre que les mesures effectuées sur les points de test et sur les points de contrôle suivant une validation croisée sont beaucoup plus contraignantes que celles effectuées sur les points de contrôle. La qualité annoncée pour un document dépend donc fortement du type de mesure. L'utilisation de l'*eqm* sur les points de contrôle comme indicateur de qualité est donc à proscrire, à moins d'effectuer une validation croisée

### V. L'INFLUENCE DE DIFFÉRENTS FACTEURS SUR LA QUALITÉ

Dans la première partie du chapitre, l'accent a été mis sur la qualité de la correction géométrique et l'influence de plusieurs facteurs. Les sources de déformations lors de l'enregistrement sont la principale cause de l'application des corrections géométriques. Cependant, les méthodes de correction et de rééchantillonnage employées influencent également la qualité finale du produit. La propagation des erreurs tout au long du processus en est la traduction. Dans un souci de complétude, nous clôturons ce chapitre en présentant, dans les grandes lignes, ces autres facteurs qui influencent la qualité, ainsi que les choix qui sont offerts aux utilisateurs - producteurs de spatio-cartes.

Nature des points de contrôle	Méthode de correction	<i>eqm</i> des points de contrôle (en m)	<i>eqm</i> de la validation croisée (en m)	<i>eqm</i> sur les points de test (en m)
Carte de base 1 : 25 000	Polynomiale ordre 1	8,57	10,47	12,80
Carte pseudo 1:10 000 numérisée	Polynomiale ordre 1	8,19	9,91	9,50
Base de données topographiques	Polynomiale ordre 1	3,70	4,72	4,17

Tableau 1. Estimation de différentes corrections géométriques sur une scène Kosmos selon plusieurs indicateurs de la qualité (Source : Billen *et al.*, 1999)



**Figure 15. Influence de la méthode de correction sur la qualité de positionnement de données vectorielles**  
En haut, extrait de la scène SPOT 45-247 (29/06/92) couvrant la partie nord-est de l'agglomération liégeoise (île Monsin). En bas à gauche, extrait de l'image brute corrigée suivant une orthorectification. En bas au milieu, IGN - extrait de l'ancienne carte 42/2 à 1 :10 000. En bas à droite extrait de l'image brute corrigée suivant une polynomiale du premier ordre.



### A. Choix de l'algorithme de correction

Le choix de l'algorithme de correction est évidemment prépondérant. Malheureusement, ce choix est souvent restreint car les logiciels de traitement d'images n'offrent pas toujours toutes les possibilités. Bien qu'aucune règle stricte ne puisse être imposée, les considérations suivantes sont d'habitude pertinentes.

- Si c'est techniquement réalisable, on préférera une méthode photogrammétrique plutôt qu'une méthode polynomiale (Tableau 2).
- Il n'est pas nécessaire de réaliser des corrections polynomiales supérieures à l'ordre 3. Ces fonctions introduisent des erreurs importantes pour les zones se trouvant entre les points de contrôle, même si les erreurs géométriques sur ceux-ci sont plus faibles.

La supériorité de la méthode photogrammétrique d'orthorectification par rapport à la méthode polynomiale est illustrée par l'exemple suivant. Une même zone d'une scène SPOT a été orthorectifiée et corrigée géométriquement suivant une polynomiale du premier ordre. La différence de qualité géométrique entre les deux images produites est importante surtout au pied et au sommet de versant. La figure 15, représentant un ensemble de routes tracées à partir d'un fond cartographique de l'IGNB, sert de référence. On remarque une assez bonne correspondance entre l'orthoimage et la référence. Par contre des déplacements très importants en certains endroits (entre 5 et 10 pixels) affectent l'image corrigée par la polynomiale

L'influence du choix de la méthode de rééchantillonnage sur la qualité géométrique est relativement faible. Le choix porte plutôt sur la conservation, ou non, des valeurs radiométriques

originales, elle même dictée par les opérations envisagées en aval de la correction géométrique.

### B. Choix des données externes

Habituellement, de nombreuses données externes entrent dans le processus de correction géométrique. Elles sont soit fournies par le producteur (certificat de calibration, paramètres orbitaux, etc.), soit du ressort de l'utilisateur (points de contrôle, MNÉ). L'utilisateur doit être particulièrement vigilant à ces données et aux erreurs qu'elles introduisent dans le système de correction.

Les MNÉ interviennent dans le processus d'orthorectification. Le rapport entre la précision du MNÉ et celle de l'orthoimage est notamment abordé par Toutin (1996).

Pour rappel, les points de contrôle ou points d'amer sont des points connus dans le système image et dans le système de référence, et permettent de calculer les paramètres de la transformation d'un système vers l'autre. Leur nature, leur précision, leur nombre et leur arrangement dépendent du type de données à corriger. Trois aspects sont développés ci-dessous : l'influence de la nature des points, l'influence de la qualité géométrique des points et l'influence du nombre de points.

#### 1. Influence de la nature des points

La nature des points de contrôle varie en fonction de la nature et surtout de la résolution de l'image. Ainsi, sur une image SPOT, on recherchera préférentiellement des points à des intersections de routes ou tout autre élément d'origine anthropique visible. Une image AVHRR de résolution

MÉTHODE POLYNOMIALE	MÉTHODE PHOTOGRAMMÉTRIQUE
Ne respecte pas la géométrie de prise de vue	Respecte la géométrie de prise de vue
N'est pas reliée aux causes de distorsions	Reflète les différentes distorsions
Ne tient pas compte de l'attitude	Utilise les données d'éphémérides et d'attitudes
Ne corrige pas l'altimétrie	Tient compte de l'altimétrie
Corrige localement aux points d'appui	Corrige globalement l'image
Ne filtre pas les erreurs	Filtre les erreurs grâce à la connaissance de la géométrie
Pas de compensation simultanée d'images	Compensation simultanée de plusieurs images
Correction d'image à image pour l'intégration	Correction d'images à terrain
Nécessite beaucoup (20) de points d'appui par image	Utilise peu (3-8) de points d'appui par image
Sensible à la distribution des points d'appui (modèle local)	Peu influencé par la distribution des points d'appui (modèle global)
Problème de choix des points de liaison	Choix des points d'appui en fonction de chaque image

Tableau 2. Comparaison entre les méthodes polynomiale et photogrammétrique (Source : Toutin, 1996)

géométrique de 1 km ne permettra pas de déceler ce genre de structure et on choisira plutôt des points à la frontière de zone à forte extension (limite de forêt, etc.). À l'autre extrême, en photographie aérienne, des éléments très petits peuvent servir de points de contrôle (avaloires, etc.). Les missions aériennes sont généralement précédées d'un repérage et d'un mesurage au sol de points pouvant servir au contrôle. Ces points sont marqués par un symbole identifiable (croix, cible, etc.) dont la dimension varie en fonction de l'échelle de la prise de vue pressentie. D'une manière générale, la sélection des points de contrôle se fait manuellement par un opérateur humain. Les règles qui régissent cette sélection sont relativement subjectives, mais on peut généralement admettre que :

- il ne faut pas placer les points trop près les uns des autres ;
- il faut prendre autant de points que possible ;
- il faut s'assurer que les points couvrent bien la zone d'intérêt (spécialement pour les méthodes de corrections locales) ;
- il faut disposer d'une distribution la plus homogène possible ;
- il faut prendre certains points dans les parties basses et hautes du relief.

Dans le cas d'un traitement d'images stéréoscopiques, des points de liaison entre les images doivent être choisis en vue de favoriser la création du modèle stéréoscopique. Le critère de sélection de ces points est leur reconnaissance parfaite sur les deux images. Cette reconnaissance peut être visuelle, semi-automatique ou automatique. Les algorithmes de corrélation se basent soit sur la similitude statistique des valeurs des pixels, soit sur la similitude de structure des images, ou sur une combinaison des deux.

## 2. Influence de la qualité géométrique des points

La qualité géométrique des points de contrôle est aussi en relation avec la résolution géométrique de l'image. La précision avec laquelle on doit connaître le point de contrôle dans le système de coordonnées de référence est en rapport direct, mais pas exclusif (voir aussi l'influence du nombre de points, ci-dessous), avec la résolution géométrique de l'image. Il n'est pas nécessaire de disposer de données de référence au centimètre près si on veut corriger géométriquement une image Landsat MSS. Par contre, une précision métrique n'est pas suffisante pour une photographie aérienne à grande échelle.

Le tableau 1 montre le résultat d'un test réalisé sur une photographie satellite Kosmos corrigée suivant des polynômes d'ordre 1. Les coefficients des transformations ont été calculés à partir de quinze points de contrôle, connus dans le système de la base de données topographiques (précision absolue de 15 cm) et dans le système des cartes (précision absolue de

6,25 m). Il apparaît que les points de contrôle de plus grande précision absolue offrent les meilleurs résultats. Tout le problème est de trouver la précision absolue optimum afin, d'une part, de corriger au mieux l'image et, d'autre part, ne pas augmenter le coût des données, l'augmentation de la qualité s'accompagnant souvent de celle du prix. De plus, un seuil existe au-delà duquel l'augmentation de la précision absolue des points de contrôle n'améliore plus la qualité de la correction, car leur identification sur l'image est limitée au mieux au demi-pixel (ou à la demi-résolution). Malgré quelques essais (Billen et al., 1999), il est difficile de fixer ce seuil optimum. Dans le cas des photographies (aériennes et satellite), ce seuil est fixé empiriquement à la moitié de la résolution des photographies. De nombreuses études sur l'emploi de points de contrôle de qualité géométrique différente existent, parmi lesquelles on peut citer celle sur la correction géométrique d'images SPOT et Landsat utilisant, tant des points de contrôle GPS, que des points issus de cartes topographiques (Kardoulas et al., 1996).

## 3. Influence du nombre de points

Le nombre de points de contrôle dépend essentiellement de la méthode de correction et du relief du terrain. La méthode photogrammétrique exige moins de points qu'une méthode de correction polynomiale (Tableau 2). Leur distribution importe peu dans le premier cas. Par contre, avec une méthode de correction polynomiale, le nombre et la distribution des points est un facteur important influençant la qualité géométrique. Il faut veiller à en prendre un nombre suffisamment grand, suivant une répartition homogène, en tenant compte implicitement du relief.

## BIBLIOGRAPHIE

- BALTSAVIAS E.P., 1994. Test and calibration procedures for images scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(1), 163-170.
- BALTSAVIAS E.P., 1996a. Quality analysis and calibration of DTP scanners. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 (B1), 13-19.
- BALTSAVIAS E.P., 1996b. DeskTop Publishing scanners. *Application of digital photogrammetric workstations* (Köhl O., Éd.), op. cit., 75-94.
- BILLEN R., 1997. *Conception d'un système de photogrammétrie digitale et développement de procédures de corrections et d'orientations*. Mémoire de licence en géomatique, Université de Liège, inédit.
- BILLEN R., CORNÉLIS B., SHEEREN D., DONNAY J-P. & PANTAZIS D., 1999. Influence de la précision absolue des points d'amer sur la qualité de la géoréférenciation des images à très haute résolution. *Actes des VII<sup>e</sup> journées*

- scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF : La télédétection en francophonie: analyse critique et perspective, à paraître.
- CORNÉLIS B. & PATTYN F., 1997. *Geocoding SPOT image coverage of Belgium : evaluation and optimization of rectification procedures*. Étude de faisabilité, SURFACES, Université de Liège et Geografisch Instituut, Vrije Universiteit Brussel, inédit.
- DENÈGRE J. (Éd.), 1994. *Cartographie thématique dérivée des image satellitaires, un guide*. Association cartographique Internationale, Pergamon-Elsevier, Oxford.
- FOLVING S. & DENÈGRE J., 1994. Méthodes de combinaison des informations d'origine satellitaire et des informations de sources classiques. *Cartographie thématique dérivée des image satellitaires, un guide* (Denègre J., Éd.), op. cit., 234-250.
- KARDOULAS N., BIRD A. & LAWAN A., 1996. Geometric correction of SPOT and Landsat imagery : a comparison of map- and GPS-derived control points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(10), 1173-1177.
- photogrammetric workstations. *Proceedings of the OEEPE workshop, mars 1996, Lausanne*, Institut für Angewandte Geodäsie, Francfort.
- KRAUS K., 1993. *Photogrammetry. Volume 1*, 4<sup>e</sup> édition, Dümmlers Verlag, Bonn.
- KRAUS K., 1997. *Photogrammetry, advanced methods and applications. Volume 2*, Dümmlers Verlag, Bonn.
- LAUER D., 1994. Processus d'extraction d'informations à partir des données satellites. *Cartographie thématique dérivée des image satellitaires, un guide* (Denègre J., Éd.), op. cit., 216-233.
- MACGWIRE K., 1996. Cross-validated assessment of geometric accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(10), 1179-1187.
- MIKHAIL E., 1976. *Observations and least squares*. IEP series in Civil Engineering, Dun Donnelley, New York.
- OKABE A, BOOTS B. & SUGIHARA K, 1992. *Spatial Tessellations. Concepts and Applications of Voronoi" Diagrams*. Wiley, Chichester.
- RENOUARD L., 1991. *Restitution automatique du relief à partir de couples stéréoscopiques d'images du satellite SPOT*. Thèse de doctorat en informatique, École polytechnique (France), inédit.
- RICHARDS J.A., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introcution*. Springer Verlag, Berlin.
- RIDLEY H., ATKINSON P., ALPIN P., MULLER J-P. & DOWMAN I., 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the Ordnance Survey. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(8), 997-1005.
- RONGXING L., 1998. Potential of high-Resolution satellite imagery for national mapping products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(12), 1165-1169.
- RONGXING L., ZHOU G., YANG S., TUELL G., SCHMIDT N. & FOWLER C, 2000. A study of the potential attainable geometric accuracy of ikonos satellite imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(B4), 587-594.
- SCHENK T., 1999. *Digital Photogrammetry*. Volume 1, TerraScience, Laurelville.
- SPACE IMAGING, 2000. *High Resolution products (Ikonos satellite)*. Space Imaging Europe, <http://www.spaceimagingeurope.com/>.
- TAHIRI D., 1997. *Modélisation du terrain à partir des cartes topographiques : méthodologie de production et propagation des erreurs*. Thèse de doctorat en Sciences, Département de Géomatique, Université de Liège, inédit.
- TOUTIN T., 1986. Étude mathématique pour la rectification d'images SPOT. *Comptes rendus du XVIII<sup>e</sup> congrès international des géomètres, Toronto, Canada, du 1 au 11 juin*, 379-395.
- TOUTIN T., 1995. Intégration de données multisources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, 16(15), 2795-2811.
- TOUTIN T., 1996. La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. *Journal canadien de télédétection*, 22(2), 184-189.
- WILMET J., 1996. *Télédétection aérospatiale, méthodes et applications*. SIDES, Fontenay-sous-Bois.