

Rectification géométrique et restitution photogrammétrique des images SPOT

par H. GUICHARD - SPOT Image

1 — Produit cartographique

1.1 Utilisation en cartographie topographique

La possibilité d'utiliser les données SPOT en cartographie dépend de deux facteurs qui détermineront en particulier l'échelle utile des cartes à réaliser.

Tout d'abord, la précision géométrique. La conception de SPOT et notamment la stabilité de l'attitude du satellite et la connaissance de ses variations par les enregistrements à bord, fait que les résultats de précision en planimétrie et altimétrie de la restitution de deux images avec un B/H suffisant restent compatibles avec les spécifications les plus sévères de la cartographie au 1/50 000 et peut-être celles du 1/25 000 dans certains cas.

Le second facteur est la possibilité de reconnaître les détails du terrain et la taille du pixel (10 m) ne permet pas dans beaucoup de cas de les reconnaître ; ce fait obligera à un complètement qui pourra être assez important selon les cas et les normes cartographiques de chaque pays. Mais, joue alors un facteur économique et le coût de la restitution par SPOT étant bien plus bas que celui d'une prise de vue aérienne et d'une restitution classique, la restitution à base d'images SPOT, ne serait-ce que des courbes de niveaux, sera déjà très rentable. Par ailleurs, bien des pays ne disposent pas encore de cartographie de base et seront très heureux de pouvoir disposer très rapidement et à bas prix, d'orthophotographies établies à partir des images SPOT et des planches de courbes de niveau correspondantes. Il faut signaler aussi que la spatiotriangulation peut fournir très simplement une chaîne de points d'appui de précision dans des zones sans géodésie.

1.2 Rectification d'images à usage thématique - produits géocodés

Dans bien des cas, et notamment dans celui d'études multitemporelles, la rectification, c'est-à-dire la transformation d'une image en un produit superposable à une carte avec une précision meilleure qu'un pixel, sera nécessaire. Cette rectification repose sur l'existence d'un MNT (modèle numérique de terrain) qui provient de la numérisation des courbes de niveau d'une carte (si la cartographie existe) ou de la restitution de données photogrammétriques et notamment de données SPOT. Comme nous le verrons, avec 6 points d'appui, la rectification est immédiate. La rectification systématique des images prises sur la même zone pourra se faire

automatiquement par corrélation numérique avec les points d'appui dont l'image élémentaire aura été enregistrée.

De telles rectifications correspondent à la notion de produits géocodés dont le développement paraît, dès à présent, prometteur.

1.3 Traitements cartographiques liés aux produits précédents

Pour répondre aux besoins d'un maximum d'utilisateurs, le traitement permettant d'obtenir de tels produits doit avoir les caractéristiques suivantes :

- précision en rapport avec les normes cartographiques ou précision recherchée pour répondre à un besoin thématique ;
- rentabilité et faible coût du traitement (par exemple nombre réduit de points d'appui, traitement par segment) ;
- simplicité : possibilité d'exploitation par des organismes dotés de moyens habituels de traitement numérique et photogrammétrique (ainsi que le personnel).

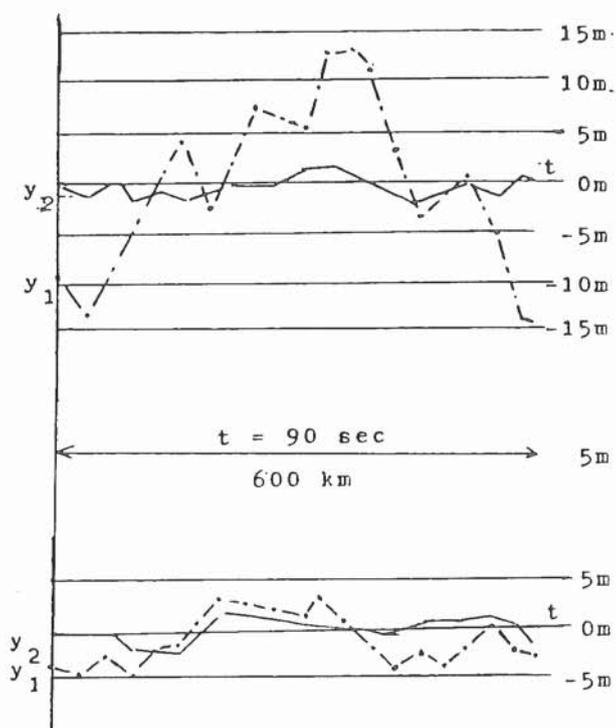
2 — SPOT en tant qu'outil cartographique

SPOT a des caractéristiques qui permettent une utilisation cartographique :

- une orbite rigide comme tout satellite d'observation de la Terre par rapport à un vol d'avion ;
- une variation d'attitude plus faible que pour un satellite à miroir de balayage mobile ;
- enregistrement des variations d'attitude ;
- et évidemment, la taille du pixel (10 m en panchromatique).

La variation faible de l'attitude et l'enregistrement de cette dernière sont les facteurs importants de la précision géométrique des vues SPOT ; les résultats d'une simulation d'attitude sont donnés page suivante.

Nous pouvons voir que sur 10 scènes, l'effet au sol est surtout linéaire en temps, cette part linéaire n'affecte pas la précision de restitution ou de rectification car elle s'intègre dans les paramètres de la modélisation ou des lois d'évolution (voir plus loin). Sans mesure à bord, les résidus restent compris dans cet exemple entre - 13 et + 13 m (cas de tangage)* et avec mesures à bord restent inférieurs à 2 m. Pour une scène, ces résultats deviennent $\pm 3,5$ m et 0,7 m.



Pour une scène : résidu Y_1 3,5 m ; résidu Y_2 0,7 m

Exemple de variation d'attitude

En haut : tangage *

Tangage* = tangage - lacet \times tg (angle de visée)

$$Y_1 = \text{tangage}^* \text{ vrai} - \delta_1 T_1 \cdot t$$

$$Y_2 = \text{tangage}^* \text{ vrai} - \text{tangage mesuré à bord} - \delta_1 T_2 \cdot t$$

$$\delta_1 T_1 = -4,16 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta_1 T_2 = -2,78 \cdot 10^{-7}$$

effet au sol linéaire en temps (± 45 sec)

$$Y_1 = \pm 155 \text{ m}, Y_2 = \pm 10,1 \text{ m}$$

En bas : roulis

$$Y_1 = \text{roulis vrai} - \delta_1 R_1 \cdot t$$

$$Y_2 = \text{roulis vrai} - \text{roulis mesuré à bord} - \delta_1 R_2 \cdot t$$

$$\delta_1 R_1 = -2,26 \cdot 10^{-6}$$

$$\delta_1 R_2 = -3,70 \cdot 10^{-7}$$

effet au sol linéaire en temps (± 45 sec)

$$Y_1 = \pm 111 \text{ m}, Y_2 = \pm 18,5 \text{ m}$$

3 — Traitements cartographiques (restitution et rectification)

Une prise de vues, de quelque nature qu'elle soit, peut toujours être analysée et traitée de manière à obtenir des résultats finaux de précision géométrique acceptable : par exemple une image prise d'avion, avec un scanneur peut être rectifiée avec suffisamment de points d'appui, en général en nombre assez élevé. Le prix du produit final sera trop coûteux pour une utilisation régulière. De manière identique, si le traitement oblige à des programmes compliqués et de nombreuses données extérieures, le coût final sera également élevé. Il faut donc

s'efforcer d'utiliser des traitements simples avec le minimum de données extérieures (points d'appui, données exactes d'orbites, données d'attitude...).

Nous verrons dans ce sens, sans entrer dans les détails qui sont développés dans d'autres publications, deux traitements qui rentrent dans cette définition.

3.1 Modélisation d'une scène

Entre les coordonnées p, q d'une image de satellite et les coordonnées X, Y, h dans une projection donnée du même point de terrain, existe naturellement une correspondance. Si x, y, h représentent les coordonnées dans une projection conforme particulière (celle d'ailleurs du niveau 1B) centrée sur le centre de la scène et dont l'axe Mx est tangent au balayage central, nous pouvons donner une correspondance $(X, Y) \Rightarrow (x, y)$ si nous connaissons la position du centre M_0 et l'orientation γ de Mx dans le système X, Y .

Si X, Y est une projection conforme (cas quasi général) :

$$Z = Z_0 + E(z + k \cdot z^2) \text{ avec } E = |E| e^{i\gamma}$$

$|E|$ = échelle locale très voisine de 1

$|kz^2| < 8$ m dans les projections cartographiques usuelles.

$$P \cdot p + y \cdot (1 + \delta \gamma \cdot X_1) - H_1 - H_0 \cdot |V_{T^*}| = 0$$

$$X_1 + \frac{\theta \cdot a \cdot q}{1 + \theta \cdot a \cdot q} \cdot H_1 + \frac{a \cdot q}{1 + \theta \cdot a \cdot q} \cdot Q - Q \cdot |V_R| = 0$$

$$X_1 = (x - a \cdot y) \cdot \left(1 + \frac{h}{N_0}\right) + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y$$

$$H_1 = h - \frac{x^2}{2N_0} \quad \alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ (SPOT P)}$$

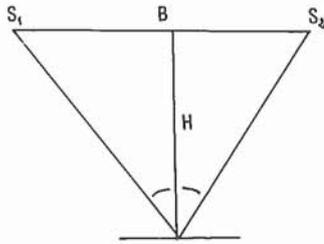
V_{T^*} et V_R représentent les variations d'attitude dont il suffit de prendre les termes non linéaires en temps (les termes linéaires sont intégrés en $P \cdot p$ et $a \cdot y$) ce qui fait que les erreurs résiduelles correspondront aux valeurs indiquées dans la page précédente (de l'ordre de 0,7 m ou 3,5 m suivant qu'on utilise ou non les mesures à bord). Les termes $\delta \gamma$, b , c de second ordre et N_0 sont déterminés facilement à partir de la latitude de la scène, $|E|$ peut être intégré en P et Q . Il reste seulement 8 inconnues et celles-ci peuvent être déterminées avec 4 points d'appui mais il est raisonnable d'en prendre 6 pour mieux assurer la détermination par moindres carrés.

La modélisation d'une scène est très intéressante par la possibilité qu'elle offre de déterminer immédiatement les effets de chaque paramètre résultant de l'orbite de la Terre, de la prise de vues, de l'attitude, connaissant le développement de chaque terme des équations en fonction desdits paramètres.

3.1.1 Rectification d'une scène

Avec un modèle numérique de terrain, il est clair qu'on obtient immédiatement pour chaque point du maillage (où h est connue) les coordonnées p, q correspondantes, ce qui permet la rectification finale par simple interpolation.

3.1.2 Restitution de deux scènes de B/H suffisant



Comme en photogrammétrie classique, si le B/H (de l'ordre de $\theta_1 - \theta_2$) des équations précédentes) est suffisant, il y a possibilité de déterminer les altitudes de la zone commune à deux scènes. Avec des points d'appui et en piquant (numériquement ou photogrammétriquement) les coordonnées d'un certain nombre de points homologues, on peut déterminer également les coefficients de la modélisation de chacune des deux scènes par moindres carrés.

— Restitution par appareil analytique.

Les pointés se font dans l'appareil et la détermination des coefficients de modélisation est faite par le calculateur associé à l'appareil. La restitution se fait comme en photogrammétrie classique en utilisant les lois de modélisation pour piloter l'appareil (au lieu des lois de la photogrammétrie classique). Cette restitution peut fournir soit directement une carte (exploitation habituelle) ou seulement les courbes de niveau qu'on transforme en un MNT qui permettra ainsi la rectification (orthophotographie) d'une des deux images.

— Corrélation automatique.

En utilisant le fait qu'on peut transformer chaque image en lignes quasi-équipoles (dans le cas de SPOT, "quasi" est presque de trop), la comparaison des lignes homologues peut donner lieu à une corrélation numérique ligne par ligne qui fournira directement un modèle numérique de terrain.

3.2 Spatiotriangulation

En général, il est rare qu'une scène soit prise de façon indépendante : plusieurs scènes consécutives sont prises avec le même angle du miroir, ce qui constitue un segment - ensemble de scènes successives.

Il peut être plus intéressant et économique d'utiliser dans ce cas un nombre plus bas de points d'appui pour chaque scène, pour faire la rectification de l'image.

Egalement, dans le cas de zones sans géodésie, il sera possible de donner les modélisations des scènes prises sur ces régions s'il existe des points d'appui au Nord et au Sud du segment.

Le principe général est le suivant :

— traitement en coordonnées géographiques λ, ψ (latitude géocentrée), h qui fait que le même programme peut être utilisé pour un ou plusieurs segments ayant une zone commune ;

— fixation des paramètres d'attitude : nous écrivons par exemple :

$\text{roulis} = \text{constante} + a_R \cdot t + (\text{mesures à bord})$, t étant le temps, a_R un paramètre constant ;

— orbite "réelle" d'où "rigide" : les paramètres ne varient pas de manière quelconque mais obéissent aux lois de la mécanique céleste qui s'expriment très simplement pour un segment de 600 km ;

— avantage de :

- élimination aisée des points faux
- valeur géodésique quelconque des points
- simplicité
- possibilité de traiter beaucoup de segments en même temps avec peu d'inconnues.

Méthode :

1) Pose des lois d'évolution des paramètres d'orbite (ρ, w, l, Ω') et de la prise de vues (angle de prise de vue, attitude) en fonction du temps t et du rang q , au pixel dans la ligne de balayage.

2) Pour chaque point, calcul des coordonnées λ_c, ψ_c à partir des lois d'évolution (équations très simples).

3) Equations d'observation : les différences $\cos \psi (\lambda - \lambda_c)$ et $\psi - \psi_c$ (λ, ψ étant les coordonnées vraies) peuvent s'exprimer en fonction des variations de certains paramètres (jouant ainsi le rôle d'inconnues) des lois d'évolution et dans le cas de points homologues (où λ, ψ, h sont inconnues de Δh , différence d'altitude avec une latitude approchée).

Il y a deux cas :

- points d'appui (pour 2 segments) : 2 fois 2 équations sans changement en λ et ψ
- points homologues : élimination de λ et ψ entre les équations en λ et ψ de deux segments, ensuite de Δh pour obtenir finalement une seule équation. Le résidu de cette dernière donne à chaque itération une valeur approchée de Δh ;

— équations complémentaires : ces équations fixent les variations extrêmes des paramètres dans les limites des spécifications (réalité et connaissance de l'orbite, limite des paramètres d'attitude). Elles servent à l'élimination des points faux et d'un autre côté permettent d'employer des points de valeur géodésique médiocre.

4) Normalisation et résolution par moindres carrés.

5) Amélioration des paramètres inconnus des lois d'évolution (ainsi que des altitudes h des points homologues) par les résultats précédents.

6) Itération à partir de la phase 2.

7) Après itérations en nombre suffisant, résultats finaux :

- paramètres connus des lois d'évolution
- coordonnées λ, ψ, h des points homologues.

Il faut signaler que :

— la description des lois d'évolution est très simple ainsi que la forme mathématique des coefficients des équations d'observation ce qui fait que la mise au point d'un programme informatique ne pose pas de problèmes ;

— il y a 11 inconnues au maximum par segment et de ce fait le problème de spatiotriangulation est bien plus simple et aisé que le problème d'aériotriangulation photogrammétrique.

4 – Résultats

L'étude menée à l'IGN France par M. Th. Toutin se poursuit avec des simulations CNES (orbite et prises de vues) et Matra (attitude).

	attitude vraie (vérification)	mesures à bord (cas réel)	sans mesures à bord
Erreur sur le centre de scène	0	<3,5 m	<23 m
Cohérence d'une scène (erreur moyenne des points par rapport au centre)	0	<1,4 m e.m.q. 0,8 m	<5 m e.m.q. 2,7 m

2 - 11 points répartis sur un segment de 600 km mais avec des erreurs aléatoires sur les points de l'ordre de 100 m (allant jusqu'à 200 m) ; mesures à bord. Résultat : cohérence des points d'une scène meilleure que 10 m.

3 - 2 segments de 600 km, 5 points au Nord, 5 points au Sud, B/H = 1 erreur moyenne de pointé monoscopique 5 m, 83 points homologues, erreur relative de pointé stéréoscopique : 2 m ; mesures à bord. Résultats (sur des points de maillage de vérification et les points homologues). Erreur de centre de scène 5 m. Cohérence en x,y dans une scène : 2 m. Détermination de h sur les points homologues : 3 m en h.

1 - Segment isolé, 10 points d'appui (5 au Nord, 5 au Sud), longueur du segment 600 km (10 scènes).

4 - Il faut signaler que des simulations SPOT sur l'Équateur d'un contrat Clirsen/CNES furent étudiées sur l'appareil analytique Traster de l'IGN (clichés restitués au Vizir au 1/200 000, angles $\pm 24^\circ$, 14 points d'appui valeur moyenne 5 m, 80 points homologues pointés).

En x,y le résidu moyen sur les points d'appui est de l'ordre de 0,7 pixel : l'erreur moyenne de la détermination des altitudes des points homologues est de 5,6 m.

Ces résultats sont très prometteurs et en plein accord avec les résultats précédents, étant donné que les restitutions Vizir sur film utilisées pouvaient avoir des résidus non linéaires de distorsions allant jusqu'à 25 μ m.