

EXTRACTION AUTOMATIQUE DE MNT À DIFFÉRENTES RÉOLUTIONS

L. RENOUARD

ISPRS - Commission IV

ISTAR - Espace Beethoven - Route des Lucioles
BP 037 - 06901 SOPHIA ANTIPOLIS - FRANCE

BUT

Mesurer le relief à partir d'images de satellites est devenu une réalité avec SPOT en 1986, et a permis d'introduire les techniques de traitement d'image en photogrammétrie numérique. Ce qui permet d'obtenir de nouveaux produits comme les MNT et les orthoimages à partir de SPOT mais aussi à partir de photographies aériennes. Après avoir rappelé l'algorithmie employée pour extraire un MNT d'un couple stéréoscopique, cet article présente une analyse de la précision des MNT. Les résultats permettent de préciser les paramètres critiques pour obtenir le MNT dans la perspective des satellites à capacité stéréoscopique avant-arrière.

PURPOSE

The idea of measuring ground relief using satellite images became a reality with the launch of SPOT in 1986, and led to introduce computer vision techniques in numerical photogrammetry. This allows to obtain new products such as DEMs and orthoimages from SPOT but also from aerial photographs. This paper first describes the algorithms used to extract a DEM from a stereoscopic pair of images, then presents an analysis of the accuracy of DEMs. The results help to precise the critical parameters to obtain a DEM in the perspective of new satellite systems with forward-backward stereoscopic capability.

MOTS CLÉS : MNT, Modèle Numérique de Terrain, Orthoimage, Stéréoscopie, SPOT, Cartographie.

KEY WORDS : DEM, DTM, Orthoimage, Stereoscapy, SPOT, Cartography.

1. INTRODUCTION

Mesurer le relief à partir d'images de satellite telle est la possibilité offerte par SPOT depuis 1986. De nombreuses méthodes ont été abondamment décrites dans la littérature (Dowman,1987), (Renouard,1987). En schématisant, SPOT est un appareil photographique placé en orbite, muni d'un puissant téléobjectif que l'on peut orienter vers la terre dans la direction de la zone à photographier (Cnes,1986).

Pratiquement, cette capacité est obtenue au moyen d'un miroir orientable qui permet au satellite SPOT de regarder soit vers l'Est, soit vers l'Ouest tout en se déplaçant sur son orbite qui joint les deux pôles. Ainsi, grâce à sa visée latérale, SPOT peut observer une même région sous deux angles différents et créer un couple stéréoscopique d'images numériques, dont le traitement informatique permet la restitution du relief.

Cette article rappelle les caractéristiques des MNT et orthoimages qui sont extraits de l'imagerie SPOT, tels qu'ils ont été industrialisés à ISTAR. L'application des méthodes développées pour SPOT à la photographie aérienne est récente et permet d'extraire MNT et orthoimages à des résolutions métriques. La tendance aujourd'hui étant à la fabrication de blocs de MNT qui incluent de 4 à 10 couples stéréoscopiques.

Suit ensuite une présentation succincte de la technique employée pour l'extraction du relief à partir des couples stéréoscopiques. On insiste sur points qui font l'originalité des méthodes développées à ISTAR pour l'extraction du MNT.

Le paragraphe précision erreurs présente des résultats quantitatifs sur la précision des MNT SPOT. La critique de ces résultats permet de préciser les besoins en stéréoscopie avant-arrière et ouvre les perspectives pour les satellites futurs.

La stéréoscopie n'est pas la seule méthode pour extraire le relief à partir de données spatiales. Quelques exemples en imagerie SAR concluent cet article et renvoient à d'autres travaux (Perlant,1992).

2. PRODUITS MNT ET ORTHOIMAGES

2.1 Modèle Numérique de Terrain SPOT

Le MNT est un fichier altimétrique, présentant le réseau régulier des altitudes d'un domaine géographique. Le MNT est un produit géocodé dans un système cartographique ou géographique. Il se présente, en général, sous la forme d'une image raster codée sur deux octets. Le format d'échange est variable suivant les différentes applications. Il existe des formats standards comme les formats USGS, DTED, IGN ... Sinon c'est un format raster qui est employé pour échanger les données.

Le MNT SPOT est fabriqué à partir de couples stéréoscopiques d'images panchromatiques (P), ou multispectrales (XS), en général de niveau 1A, éventuellement de niveau 1B (on se ramène au cas précédent). Le couple doit faire l'objet d'une validation avant la restitution altimétrique.

Pour constituer un couple stéréoscopique, il convient de disposer d'une paire d'images présentant deux propriétés géométriques : les deux images doivent avoir une zone de recouvrement et la différence entre les deux angles de prise de vue doit être suffisante pour permettre une restitution. Cette différence est mesurée par le rapport b/h - rapport base sur hauteur - qui doit être au moins de l'ordre de 0.5.

Cependant ces critères géométriques ne sont pas suffisants. La validation d'un couple stéréoscopique d'images SPOT pour une restitution altimétrique nécessite l'examen des quick-looks. Les points

examinés lors de la validation des quick-looks sont en particulier, les couvertures nuageuses et neigeuses sur chacune des deux images, la qualité radiométrique de chacune des deux images et les différences radiométriques entre les deux images du couple.

2.2 Orthoimage SPOT

L'orthoimage est l'image numérique noir et blanc ou couleur d'un domaine géographique. L'orthoimage est superposable à une carte. C'est un produit géocodé, corrigé des déformations géométriques dues au mode de prise de vue et au relief du terrain. Dans le cas de SPOT, l'orthoimage est obtenue par rectification de l'image SPOT au moyen du MNT.

2.3 Vecteurs planimétriques

A partir de SPOT, il est possible d'extraire des fichiers planimétriques par photo-interprétation assistée par ordinateur. Il est possible de renseigner les thèmes suivants : réseau routier, réseau de transport (voie ferrée), plan d'eau (mer, lac, marais), cours d'eau, zone forestière, zone urbaine, zone industrielle, structure remarquable (port, aéroport). On consultera (Nonin,1992) pour plus de détails sur les différents processus employés.

2.4 Produits AERO

A partir de photographies aériennes au 1/30 000^{ème} couleur ou noir et blanc, scannées à 33 ou 66 microns, on obtient en utilisant des techniques similaires à SPOT des MNT et orthoimages à résolution métrique.

2.5 Points d'appui, cartes, précision absolue et relative

Pour caler un MNT ou une orthoimage on utilise des points d'appui. Ces points d'appui sont des points repérés sur les images, dont les coordonnées sont relevées sur la carte. Ces points sont utilisés pour le calage géométrique de la prise de vue.

La précision absolue dépend de l'échelle des cartes utilisées pour la saisie des points d'appui. Sans cartes suffisamment précises on peut envisager une mission sur le terrain, ou utiliser des cartes à petite échelle. La précision relative dépend de la résolution du capteur (aérien ou SPOT) et du rapport b/h dans le cas du MNT.

2.6 Caractéristiques techniques

Le tableau suivant donne une synthèse des différentes caractéristiques techniques des données géographiques numériques extraites de SPOT et de clichés aériens.

Capteur	SPOT	SPOT	AERO
Mode spectral	PA	XS	C ou NB
Surface unitaire km	60 x 60	60 x 60	3 x 6
Maille du MNT	20 m	40 m	4 m
Maille de l'orthoimage	10 m	20 m	2 m
Equidistance des courbes de niveau	20 m	40 m	5 m
Echelle de restitution ⁽¹⁾	50 000	25 000	10 000
Planimétrie surfacique	-	oui	oui
Planimétrie linéaire	oui	-	oui
Précision planimétrique	10-12	18-20	6 ⁽²⁾
Précision altimétrique	8-13	10-18	2,5-3,5 ⁽³⁾
Echelle des carte pour la saisie des points d'appui	100 000	50 000	25 000

(1) Plus grande échelle d'agrandissement sur papier.

(2) Peut être amélioré si les points d'appui sont saisis sur une carte au 1/10 000^{ème} ou levés sur le terrain.

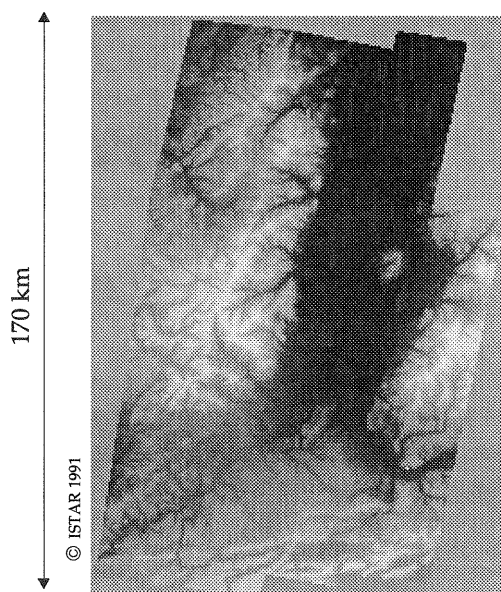
(3) Altitude sursol : terrain + superstructure ou végétation.

2.7 Mosaïques de MNT

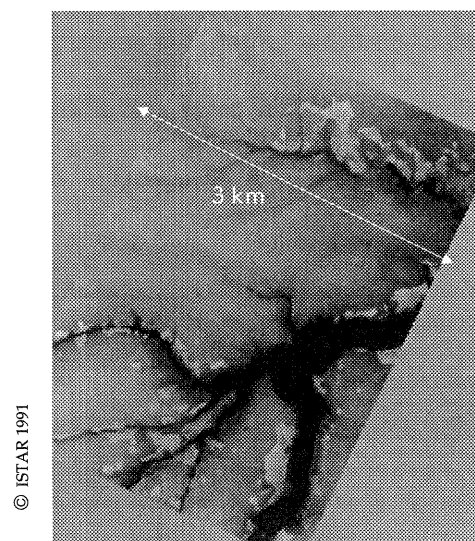
Pour fabriquer des mosaïques de MNT on utilise un programme de spatitriangulation, qui est une généralisation immédiate de l'approche "multicapteur" développée pour le calage géométrique des images SPOT (voir le paragraphe 3.3 modélisation géométrique). Le même outil est utilisé pour les photographies aériennes.

En effet, l'algorithmie employée permet le calage géométrique d'un nombre quelconque d'images provenant d'un seul ou de plusieurs capteurs, rendant possible la fusion de données et généralisant la spatio ou aéro triangulation.

L'image suivante présente une mosaïque de 6 MNT SPOT réalisée sur l'Alsace à partir de 13 scènes SPOT XS. La résolution du MNT est de 40 mètres, il est inscrit dans un rectangle de 120 km d'est en ouest et de 170 km du nord au sud. Les zones les plus hautes sont à 1420 mètres d'altitude, les zones les plus basses sont à 110 mètres d'altitude.



La figure suivante présente une mosaïque de MNT sur la région de Bernay (Eure, France) réalisée à partir de 4 couples de photographies aériennes au 1/30 000^{ème} scannées à 66 microns. La maille du MNT est 4 mètres.



3. MISE EN CORRESPONDANCE STÉRÉOSCOPIQUE

3.1 Principe de calcul du MNT

Méthode classique

De nombreux méthodes sont disponibles dans ce domaine (Muller,1989). En général, le MNT est calculé en 3 étapes successives :

1. Calage géométrique du couple et rééchantillonnage des deux images suivant les lignes épipolaires.
2. Corrélation suivant les lignes épipolaires et extraction d'un MNT.
3. Correction et validation du MNT.

Cette méthode peut être utilisée, mais présente une difficulté, il est nécessaire de disposer des points d'appui avant tout traitement de corrélation. De plus, les données intermédiaires archivées sont dépendantes du calage géométrique effectué.

Or avec SPOT, les deux étapes critiques du processus sont les points 2. et 3 ci-dessus. D'autre part le point 1 est sujet à mises à jour; il est fréquent de caler un couple SPOT avec une carte au 1/250 000^{ème} puis avec des points GPS une fois la mission sur le terrain effectuée.

Pour éliminer cette difficulté nous avons développé une méthode (Renouard,1991) qui permet de réaliser la corrélation des images en l'absence de points d'appui.

Méthode ISTAR

La méthode ISTAR d'extraction du MNT est un processus en 3 étapes :

1. Corrélation des deux images du couple.
2. Correction et validation de la carte de disparité.
3. Calage géométrique du couple, restitution du MNT.

Ces 3 étapes appellent les remarques suivantes :

A la place de corrélation, il est plus juste de parler de mise en correspondance de deux images - terme propre au domaine du traitement d'image - la corrélation étant l'une des techniques de mise en correspondance.

Le résultat de la première étape est une carte de disparité qui permet de déterminer pour chaque pixel (xd,yd) de l'image de droite, son correspondant (xg,yg) sur l'image de gauche.

La deuxième étape est une étape longue qui nécessite un travail interactif sur console, son résultat peut être archivé.

La troisième étape peut être menée avec différents jeux de points d'appui.

3.2 Corrélation des deux images du couple

On procède en 5 étapes :

1. Liaison des deux images par un modèle d'ordre 2.
2. Détermination de la parallaxe approchée en x.
3. Détermination de la parallaxe en y.
4. Calcul d'une image ig' éliminant la parallaxe en y.
5. Détermination de la parallaxe en x.

Liaison des deux images par un modèle d'ordre 2

A partir d'au moins 6 points homologues saisis lors de la visualisation du couple on détermine le modèle :

$$xg_a = a_0 + a_1xd + a_2yd + a_3xd^2 + a_4xdyd + a_5yd^2$$

$$yg_a = b_0 + b_1xd + b_2yd + b_3xd^2 + b_4xdyd + b_5yd^2$$

qui donne la position approchée (xg_a,yg_a) du correspondant (xg,yg) du point (xd,yd) sur l'image de droite. Les traitements suivants ont pour but de calculer deux valeurs dx et dy appelées respectivement disparité en x et disparité en y, telles que :

$$xg = xg_a + dx$$

$$yg = yg_a + dy$$

On suppose dans la suite que x est la direction principale de parallaxe, et que dy est faible de l'ordre de quelques pixels.

Détermination de la parallaxe approchée en x

On utilise pour déterminer une valeur approchée de dx une méthode hiérarchique de mise en correspondance basée sur une extraction et un appariement des contours verticaux des deux images, ceci à différentes résolutions, de la plus grossière à la plus fine. Inspiré des méthodes développées dans (Grimson,1981), ce type d'algorithmes permet de déterminer dx avec une précision moyenne de 2 pixels.

Détermination de la parallaxe en y

On effectue une corrélation suivant la direction y de l'image : on cherche le pic de corrélation normalisé le plus proche avec une fenêtre 9x9 et un seuil de corrélation faible égal à 0.2. Compte tenu de l'imprécision en x le résultat est très bruité. Cependant la disparité en y, dy, est une valeur qui peut être modélisée simplement. Pour la majorité des couples rencontrés - et en particulier pour SPOT - on peut écrire :

$$dy = a(x, y) + b(x, y) dx$$

où a(x,y) et b(x,y) sont deux fonctions à basse fréquence spatiale dans l'image. Ensuite, connaissant dy (bruité) obtenu par corrélation et dx (imprécis) on obtient en une étape de filtrage suivie d'une étape d'estimation aux moindres carrés les fonctions b(x,y) et a(x,y). La précision obtenue sur dy, par la relation ci-dessus, est meilleure que 0.1 pixels sur l'ensemble de l'image.

Calcul d'une image ig' éliminant la parallaxe en y

Connaissant dy avec une précision de 0.1 pixel il est possible de rééchantillonner l'image de gauche pour la rendre superposable à l'image de droite à une parallaxe en x, dx', près.

Appelons ig' cette image. La radiométrie de ig' en un point xd,yd est calculée par un rééchantillonnage bicubique centré sur le point xg,yg de l'image de gauche. xg et yg sont calculés de la façon suivante : xg est la coordonnée en x du point homologue de xd,yd, calculée à disparité nulle ,

$$xg = a_0 + a_1xd + a_2yd + a_3xd^2 + a_4xdyd + a_5yd^2$$

ensuite, pour calculer yg, on résout l'équation en \bar{y} :

$$xg = a_0 + a_1\bar{x}d + a_2yd + a_3\bar{x}d^2 + a_4\bar{x}dyd + a_5yd^2 + dx(\bar{x}d, yd)$$

yg est alors donné par :

$$yg = b_0 + b_1\bar{x}d + b_2yd + b_3\bar{x}d^2 + b_4\bar{x}dyd + b_5yd^2 + dy(\bar{x}d, yd)$$

L'image ig' possède des propriétés intéressantes :

- Elle forme avec l'image de droite id un couple stéréoscopique numérique, la parallaxe est parallèle à l'axe des lignes de l'image.
- Un point de id sur la ligne $y = y_d$ a son correspondant sur la ligne $yg = y = y_d$ de ig' .
- les deux images id et ig' peuvent être visualisées sur une console stéréoscopique numérique.
- la disparité dx' calculée entre id et ig' est reliée à la disparité calculée entre id et ig par une relation :

$$dx = k \times dx'$$

k est un facteur de proportionnalité fonction de xd, yd .

Détermination de la parallaxe en x

On utilise pour calculer dx' une technique de corrélation - suivant l'axe des x - avec une fenêtre de taille 9×9 et un seuil faible de 0.2. Le choix du pic de corrélation est délicat, on peut prendre par exemple le pic le plus proche à partir de l'estimation donnée par la mise en correspondance hiérarchique. Des traitements plus sophistiqués peuvent être rendus nécessaires par la qualité ou le manque de texture des images.

3.3 Calage géométrique du couple, restitution du MNT

De nombreuses méthodes de modélisation existent. La plus simple d'utilisation est (Guichard, 1987). Nous utilisons une modélisation paramétrique qui prend en compte l'ensemble des paramètres physiques de la prise de vue (Renouard, 1990).

Modélisation

Un capteur (SPOT, aérien, Landsat) est modélisé par une unique fonction qui permet à partir des coordonnées X, Y, Z d'un point M du terrain et d'un jeu $w_1, w_2 \dots w_n$ du paramètre w caractérisant la prise de vue de calculer les coordonnées images x, y de la projection m de ce point :

$$im, R^3 \times P \rightarrow R^2 \\ M(X, Y, Z), w(w_1, w_2, \dots, w_n) \rightarrow m(x, y)$$

Seule cette fonction est développée.

Calage d'un couple, d'un bloc

Le calage d'un couple, ou d'un bloc d'images est réalisé en optimisant un critère C du type :

$$C(M_i, m_i^g, m_i^d, w_i^g, w_i^d) = \sum_i^T (M_i - \bar{M}_i) (\sigma_M)^{-1} (M_i - \bar{M}_i) + \dots \\ \dots (m_i^g - \bar{m}_i^g) (\sigma_m^g)^{-1} (m_i^g - \bar{m}_i^g) + (m_i^d - \bar{m}_i^d) (\sigma_m^d)^{-1} (m_i^d - \bar{m}_i^d) + \dots \\ \dots \sum_j^T (w_j^g - \bar{w}_j^g) (\sigma_w^g)^{-1} (w_j^g - \bar{w}_j^g) + (w_j^d - \bar{w}_j^d) (\sigma_w^d)^{-1} (w_j^d - \bar{w}_j^d) \\ \text{avec } m_i^g = im(M_i, w_i^g) \quad \text{et} \quad m_i^d = im(M_i, w_i^d)$$

par une technique de moindres carrés en utilisant une bibliothèque d'analyse numérique. σ_M est la matrice de variance-covariance d'un point terrain, σ_m la matrice de variance-covariance d'un point image, et σ_w la matrice de variance-covariance du vecteur prise de vue.

Ce type de critère permet de traiter :

- Des images obtenues par des capteurs distincts.

- Un nombre quelconque d'images.
- Des points d'appui au sol de précision variable éventuellement de coordonnées inconnues, en distinguant les matrices de variance-covariance pour chaque point.
- Des points de liaison.

Fonctions inverses

Les fonctions inverses sont implémentées par des algorithmes itératifs. Par exemple, la fonction de restitution est la limite d'une suite convergente :

$$r(xd, yd, xg, yg) = (X, Y, Z) = \lim_{n \rightarrow \infty} u_n$$

avec :

$$u_{n+1} = u_n - ({}^T \nabla F(u_n) \cdot \nabla F(u_n))^{-1} \cdot {}^T \nabla F(u_n) \cdot F(u_n) \\ F(u) = F(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} id_x(X, Y, Z) - xd, id_y(X, Y, Z) - yd, \dots \\ \dots, ig_x(X, Y, Z) - xg, ig_y(X, Y, Z) - yg \end{bmatrix}$$

3.4 Bilan

La modélisation du 3.3 rend possible la fusion de données, on peut extraire géométriquement un MNT d'un couple SPOT/LANDSAT ou SPOT/ERS1. Les deux cas ont fait l'objet d'études.

La mise en correspondance n'est pas sensible à des distorsions géométriques non modélisées.

Il est possible de contrôler les distorsions géométriques dans le sens perpendiculaire à la parallaxe et dans le sens parallèle sur des terrains plats.

Cette méthode a été employée pour traiter plusieurs centaines de couples stéréoscopiques, ce qui a permis de développer une expertise importante.

4. PRÉCISION - ERREURS

4.1 Détection des erreurs

Pour qualifier un MNT, plusieurs méthodes expérimentales sont envisageables :

La première, consiste à vérifier que les deux orthoimages gauche et droite sont parfaitement superposables. On utilise pour cela plusieurs techniques :

- l'alternance rapide sur l'écran, 0.3 - 0.6 secondes, des deux images, dit mode "flicker". On ne doit pas voir de mouvement quand on passe d'une image à l'autre.
- la visualisation stéréoscopique des deux orthoimages, on ne doit pas voir apparaître le relief. Ce mode dit "stéréo" nécessite un équipement spécifique comprenant un écran alternant image droite et image gauche à 120 Hz et des lunettes pour l'opérateur.

La première des deux techniques est très simple à mettre en oeuvre et donne d'excellents résultats. Il est à noter que, sur des zones faiblement texturées, les erreurs n'apparaissent pas de façon claire.

La seconde méthode consiste à vérifier que les courbes de niveau et quelques points ou lignes remarquables comme les sommets et les vallées collent au relief, pour cela on génère deux orthoimages rectifiées avec un relief plat et les courbes de niveau associées sous forme de graphique. On utilise :

- la visualisation stéréo,
- l'anaglyphe, l'image gauche est dans un canal rouge et l'image droite dans un canal vert, l'opérateur porte des lunettes filtrantes pour séparer image gauche et image droite.

Cette méthode ne permet de valider que les éléments graphiques extraits, qui peuvent être corrigés simplement si l'on dispose d'un éditeur graphique 3D.

La troisième méthode est simple à mettre en oeuvre mais nécessite une expertise importante, elle consiste en une analyse du MNT visualisé en niveaux de gris, aidée par l'alternance d'une ou des deux orthoimages en mode flicker.

Cette méthode permet avec un peu d'expérience de détecter des erreurs très fines, sur toutes les zones du MNT, ce qui n'est pas le cas de la seconde méthode, et de préciser la qualité du rendu en terme de grain, de lissé, de netteté et de finesse du MNT. On sait sur certaines zones évaluer avec cette méthode des altitudes résultant d'une variation de disparité inférieure au dixième de pixel.

Ces méthodes, si elles permettent de détecter les erreurs importantes, et de les corriger (sous réserve de disposer d'outils automatiques, semi automatiques et manuels adaptés) ne permettent pas d'évaluer l'erreur statistique du MNT.

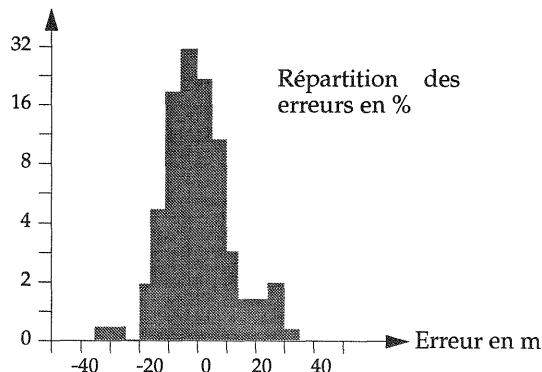
Pour établir ces valeurs statistiques, en particulier la précision à 1 sigma, soit l'écart type de l'erreur supposée gaussienne, on compare les valeurs numériques à des valeurs d'une précision connue obtenues par un processus distinct.

Trois techniques sont couramment employées :

4.2 Points cotés mesurés sur une carte scannée

On scanne une carte papier au 1/50 000^{ème} par exemple; cette carte est rectifiée dans un système cartographique. L'altitude des points cotés dont la précision sur la carte est de l'ordre du mètre est relevée, de même que les coordonnées images de ces points donnant ainsi directement les coordonnées cartographiques. Cette méthode permet d'obtenir en quelques heures plusieurs centaines de points avec une bonne précision. La différence entre l'altitude carte et l'altitude MNT est calculée, et permet d'évaluer la valeur de σ_z . L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de comparer les altitudes à des valeurs dont l'erreur peut être négligée, son inconvénient est sa limitation à un petit nombre de points.

Exemple, sur la zone de Lodeve (France) 200 points sont repérés sur la carte. La figure suivante présente la répartition des erreurs sur ces 200 points :



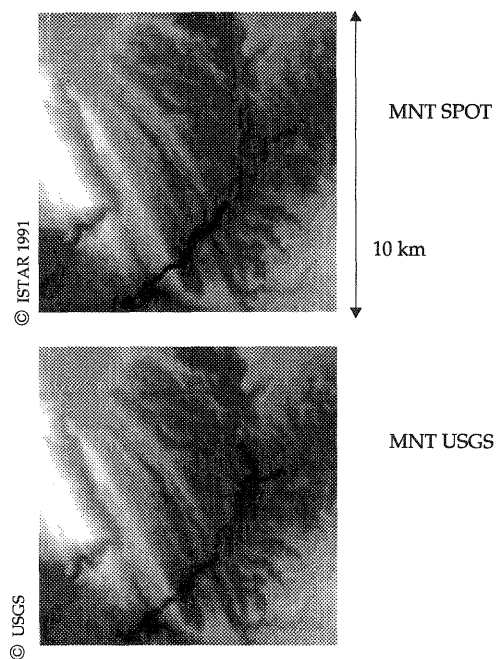
Les conditions expérimentales pour ce test sont les suivantes :

- $b/h = 1.07$ couple SPOT panchromatique
- $\Delta x = 12.8$ m (taille pixel au sol)
- $\sigma_z = 9.35$ m, 200 points.

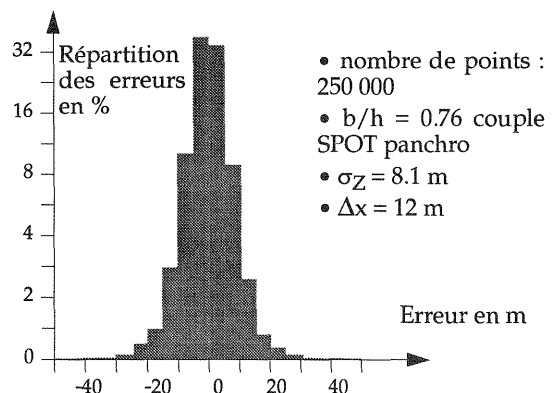
Il est à noter que cette méthode est relativement défavorable au MNT SPOT, dans la mesure où les points cotés sont généralement situés sur des zones à haute fréquence spatiale du relief (sommets, fonds de cuvettes, points remarquables ...).

4.3 Comparaison avec un MNT obtenu par digitalisation de cartes

Cette technique permet d'établir des statistiques sur un plus grand nombre de points. On utilise des MNT élaborés à partir de cartes topographiques. Les courbes de niveau et les points cotés sont digitalisés. Ces informations sont interpolées pour donner le MNT. Les données n'étant pas denses, l'interpolation est un processus délicat, et on observe toujours dans le MNT digitalisé des structures "non naturelles" dues aux algorithmes employés. Sur la zone d'Irish Canyon (USA), nous disposons d'un MNT distribué par l'USGS (United States Geological Survey) et du MNT SPOT correspondant :

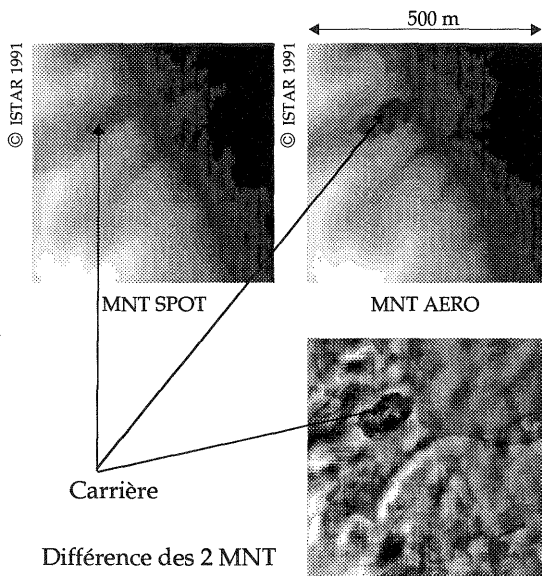


La différence entre les deux MNT est calculée. Les maxima dépassent 100 m mais correspondent à des erreurs planimétriques (voir paragraphe 4.5) :

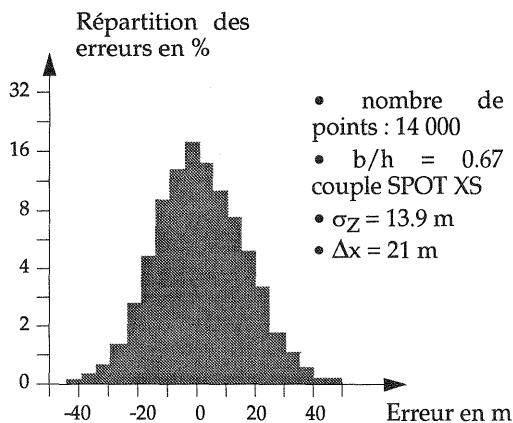


4.4 Comparaison du MNT SPOT à un MNT haute résolution

On utilise comme référence un MNT calculé par la même technique que le MNT SPOT, mais à partir de photographies aériennes numérisées, soit avec une résolution 10 fois meilleure. La précision d'un MNT de ce type est de l'ordre de 5 mètres et peut donc être négligée dans l'analyse du MNT SPOT. Cette méthode est limitée à de petites zones, elle permet de traiter un grand nombre de points et de s'affranchir du processus de digitalisation et d'interpolation. Voici un exemple sur une zone des Vosges (France) :



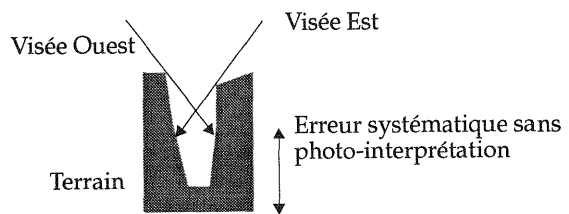
Sur ce couple multispectral, les maxima d'erreur apparaissent dans la carrière (structure haute fréquence à l'échelle de SPOT) :



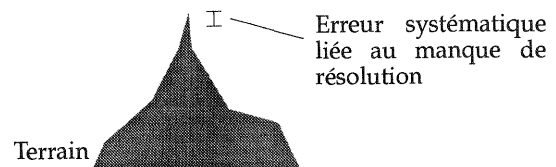
4.5 Maxima d'erreurs

Les 3 méthodes précédentes sont utilisées pour déterminer l'erreur statistique à 1 sigma, par contre, elles ne sont pas très pertinentes pour étudier la distribution des erreurs au delà de 3 à 4 fois l'écart type. A ce jour, seuls des résultats qualitatifs sont disponibles. Les maxima d'erreurs correspondent à des hautes fréquences spatiales du relief, qui ne sont pas accessibles du fait de la résolution du capteur.

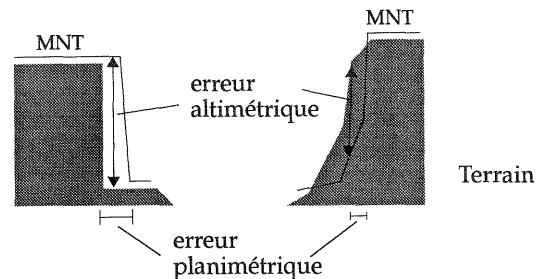
Une vallée encaissée orientée nord-sud peut être obstruée car elle n'est pas visible sur les deux images :



Ces pertes de continuité sur les fonds de vallées peuvent être corrigées par un traitement manuel. Plus critiques sont les sommets très escarpés, dont la partie extrême disparaît du fait de la résolution. Seule la visualisation stéréoscopique permet dans une certaine mesure d'apporter une correction ponctuelle.



Les résultats présentés seraient en théorie meilleurs si l'on tenait compte de l'erreur planimétrique. Ainsi une erreur de 100 mètres au bord d'une falaise ou de 60 mètres sur une forte pente sont, en général, liées à une erreur planimétrique de 10 à 20 mètres comme le montre la figure suivante :



En pratique ne pas tenir compte de l'erreur planimétrique n'augmente pas de façon significative l'écart type des erreurs altimétriques; il faut par contre faire cette analyse pour interpréter les erreurs maximales.

S'il est possible d'obtenir rapidement des valeurs sur la précision statistique et d'interpréter les erreurs maximum, aller plus en avant nécessiterait des définitions beaucoup plus précises de la donnée MNT. Vu du domaine du traitement d'image on sait parler de grain, de lissage, de netteté, de finesse ... du MNT, et par conséquent classer différents reliefs. Aucune de ces notions ne correspond aujourd'hui à une définition précise, et ce sujet reste à étudier. Un autre problème difficile est la généralisation, c'est à dire les changements de maille pour passer d'un MNT à 4 m à un MNT à 40 m par exemple. Les techniques employées actuellement sont sommaires, elles consistent en des sous-échantillonnages et lissages.

4.6 Précision du processus de mise en correspondance

On consultera (Guelch,1988) pour une obtenir une idée des précisions pour les différents types d'algorithmes de mise en correspondance.

On évalue la précision du processus de corrélation de la façon suivante. Il est possible de montrer que cette précision ne dépend pas de la précision de calage géométrique - sous réserve de disposer de points d'appui en nombre suffisant - et que la précision de mise en correspondance, σ_{st} exprimée en pixel, est reliée à la résolution Δx , au rapport b/h et à la précision altimétrique du MNT, σ_z par :

$$\sigma_{st} = \frac{b}{h} \cdot \frac{\sigma_z}{\Delta x}$$

soit pour les 3 cas présentés :

cas Lodeve	$\sigma_{st} = 0.78$ pixels
cas Irish Canyon	$\sigma_{st} = 0.51$ pixels
cas Vosges	$\sigma_{st} = 0.44$ pixels

Ces précisions sont représentatives et on peut faire les remarques suivantes :

- Lorsque les images ont une radiométrie forte et présentent des textures détaillées on atteint 0.5 voire 0.4 pixels de précision. Ceci est fréquent dans les zones semi-arides avec le canal panchromatique et quasi-systématiquement avec le canal XS 3 de SPOT.
- La valeur standard pour un couple dont la radiométrie des deux images est comparable est 0.7 en panchromatique, 0.5 en multispectral du fait de l'utilisation du canal XS 3.
- la valeur que l'on sait obtenir manuellement sur des zones moyennement texturées est voisine de 0.5 pixels en panchromatique. Par contre dans le canal XS 3 les images sont plus difficilement interprétables car "non naturelles".
- Il est théoriquement possible d'atteindre par des procédés totalement différents des précisions de 0.1 pixels ponctuellement. Par exemple, la détection d'un segment correspondant à une route peut s'envisager avec une précision de cet ordre. Cependant ces techniques ne nous paraissent pas susceptibles de se généraliser au MNT qui, pour l'instant, a une précision homogène.
- Si l'on peut imaginer atteindre de manière plus systématique 0.4 - 0.5 pixels, au delà, la limite que l'on peut espérer atteindre en automatique, sans interprétation de plus haut niveau, reste à étudier, le tiers de pixel paraît être un objectif intéressant, dans tous les cas la précision reste très liée à l'existence d'une texture sur les images.

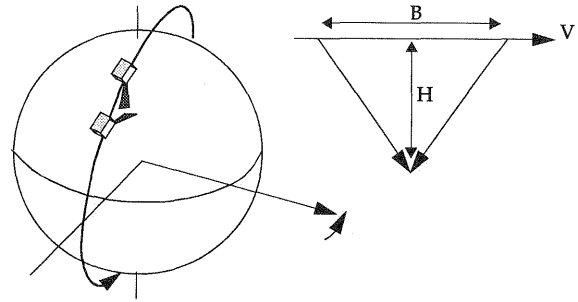
5. PERSPECTIVES

5.1 Stéréoscopie avant-arrière

SPOT est un satellite doté d'une capacité stéréoscopique, cette faculté est obtenue par deux prises de vue espacées dans le temps en utilisant la visée latérale dont l'objectif nominal est la possibilité de visite fréquente d'un site donné. Ainsi pour constituer un couple exploitable on doit disposer d'une visée ouest et d'une visée est, les deux images présentant une radiométrie comparable. Ces contraintes diminuent la probabilité d'acquisition, si par exemple on obtient une image sans nuage dans un délai de 1 mois avec une probabilité 1/2, on aura une probabilité 1/4 pour l'acquisition du couple. Ce raisonnement est à tempérer par le fait qu'une période de temps clair est généralement "stable" ce qui augmente les chances, à

contrario sur un délai d'un mois de "beau temps", les variations de la végétation sont parfois importantes créant des disparités radiométriques qui peuvent rendre un couple inexploitable. Ces difficultés d'acquisition, conduisent à rationaliser l'acquisition des données stéréoscopiques.

Si l'on place la garantie d'acquisition d'un couple stéréoscopique en tête des priorités, il apparaît qu'une acquisition simultanée des deux vues est une solution confortable. Le principe est le suivant : un instrument observe la surface terrestre en arrivant sur la zone à cartographier créant une vue Nord, le second observe la même zone vers l'arrière créant la visée Sud :



Un certain nombre de problèmes se posent. Le plus critique est d'assurer au couple d'image d'être dans tous les cas exploitable par une technique photogrammétrique qu'elle soit manuelle ou automatique. Il est alors nécessaire d'obtenir sur les deux images une radiométrie comparable, en particulier la position relative de l'axe d'incidence solaire et de l'axe de prise de vue est un point

important. Notons qu'en photographie aérienne en général ou avec SPOT les modèles stéréoscopiques sont orientés est-ouest et non pas nord-sud.

Le second point est d'assurer sur tous les types de terrains une possibilité de restitution avec une précision homogène, sans quoi l'exhaustivité n'est pas atteinte. L'expérience de SPOT montre qu'une bande spectrale dans le proche infra-rouge est indispensable, en particulier pour les zones neigeuses, les zones couvertes fréquemment par les brumes, les forêts, et pour une tâche annexe mais nécessaire : le masquage automatique des petites étendues d'eau qui doivent être planes dans le MNT et dont le nombre peut atteindre plus d'un millier sur une même scène SPOT. Ces zones ne sont détectables que de façon manuelle dans les autres bandes spectrales. Une seconde bande spectrale dans un canal proche du visible est indispensable pour l'identification des points d'appui et pour la restitution altimétrique dans les zones urbanisées. En pratique ces deux bandes sont complémentaires.

Le troisième point concerne les zones à forts reliefs, qui sont généralement les zones les plus mal connues et donc les plus nécessaires à cartographier. L'expérience montre qu'un couple avec des angles trop forts est inexploitable, et on utilise en pratique des images présentant des rapports B/H au plus égaux à 0.5 - 0.6.

La répartition des angles autour de la verticale est souhaitable pour ce type de zones car elle limite au maximum les faces cachées. Elle est appréciable de façon générale, car elle augmente le confort de visualisation stéréoscopique pour la validation du MNT au moyen de courbes de niveau présentées en 3D sur le relief.

Les autres critères sont moins critiques : la précision en Z à 1 sigma paraît moins importante que la garantie de couverture de zones complètes et la définition de précisions au delà de 3 sigma pour les systèmes informatiques qui utiliseront le MNT en aveugle. Une précision de 5 à 10 mètres sans erreurs supérieures à 30 mètres, obtenue par des processus qualifiés nous paraît être préférable à une précision accidentelle de 1 mètre et des points non renseignés ou pour lesquels les erreurs dépassent 50 mètres.

5.2 Radars imageurs de type SAR

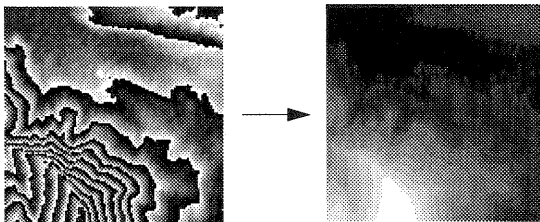
Reste le problème des couvertures nuageuses. On peut envisager alors l'utilisation d'un imageur radar de type SAR en 3 modes distincts.

Le premier mode est un mode mixte, on met en correspondance une image radar et une image verticale (SPOT par exemple). L'étude géométrique d'un tel système montre que la précision ponctuelle qu'on peut envisager est de l'ordre de grandeur du pixel au sol de chacune des deux images. Le problème ici est la mise en correspondance de deux images de natures distinctes - ou fusion de données - qui n'est envisagée pour l'instant que sous forme supervisée. L'intérêt de cette méthode est qu'elle est simple, et qu'elle est utilisable dès qu'une image non nuageuse d'une zone est disponible, ce qui est infiniment plus probable que de disposer d'un couple (2 prises de vue) constitué d'images de radiométries comparables.

Le second mode est un mode radar/radar utilisé comme un imageur optique. On met en correspondance deux images radar obtenues avec des angles de prise de vue distincts. Si on peut imaginer de bons résultats sur

des zones relativement planes et texturées, il est vraisemblable que des forts reliefs seront très peu accessibles par une telle méthode car l'image obtenue varie considérablement suivant l'angle de prise de vue.

Le troisième mode est le plus séduisant, on enregistre deux images radar à partir de deux positions très voisines du satellite. Les variations du relief sont mesurées en évaluant le déphasage entre les deux images qui sont quasi-superposables compte tenu du faible écart spatial entre les deux prises de vue. On réalise ainsi de l'interférométrie radar, et les précisions relatives mesurées pourraient atteindre le décimètre. La difficulté ici est qu'on obtient une image du relief modulo la phase du signal. Il convient de déterminer une origine, puis de compter le nombre de couches et la position dans la couche pour déterminer $Z(x,y)$.



Simulation d'un traitement interférométrique SAR

Combiner un SAR et un capteur optique semble très prometteur; ces deux instruments peuvent être utilisés sur deux plates-formes distinctes. Le radar fournit la haute fréquence du relief avec par exemple une précision de l'ordre de 1 mètre, l'optique en fournissant la basse fréquence avec une précision de 3 à 7 m.

6. CONCLUSION

Dans cet article, un point sur les activités à ISTAR en photogrammétrie numérique a été présenté. Tout d'abord sur les caractéristiques techniques des MNT et des orthoimages démontrant la maturité de ces produits extraits de l'imagerie SPOT et plus récemment de l'imagerie aérienne.

Les aspects originaux des méthodes développées à ISTAR dans ces domaines ont été présentés en particulier pour la corrélation et pour le calage géométrique des blocs d'images. Ces aspects ont été complétés par une analyse de la précision des MNT à la fois en terme d'erreur moyenne et de maxima d'erreur. L'étude des erreurs permettant de préciser les besoins en terme de précision pour les futurs systèmes.

Comme on le voit le domaine de la photogrammétrie numérique est en plein essor. La multiplication des capteurs d'une part, et des systèmes utilisant une base de données géographiques d'autre part, conduit à industrialiser la production des données géographiques, qu'elles soient 3D (MNT) ou 2D (orthoimages, vecteurs planimétriques).

Pour cela le capteur spatial par sa souplesse et son accessibilité mondiale est irremplaçable et permettra de répondre à une demande croissante de données numériques. SPOT est le premier exemple d'un capteur de ce type, nul doute qu'il sera suivi par de nombreux autres systèmes dans les prochaines années.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Cnes, 1986. Guide des utilisateurs de données SPOT, VOL 1 : Manuel de Référence, VOL 2 : Guide de l'Utilisateur, CNES et SPOT IMAGE, France.
- Dowman I.J. , 1987. The prospects for topographic mapping using SPOT data, Congrès, SPOT 1, Utilisation des Images, Bilan, Résultats. CNES, France.
- Grimson W. E. L. , 1981. From Image to Surfaces, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London.
- Guelch E. , 1988. Results of test on image matching of ISPRS WG III/4, University of Stuttgart, RFA.
- Guichard H. , 1987. Modeling accuracy of SPOT imagery HRV sensor geometry. Anticipated geometric accuracy in future applications, 13^{ème} Congrès International de Cartographie, Morelia, Mexico.
- Muller J.P. Day T. , 1989. Digital elevation model production by stereo-matching spot image-pairs : a comparison of algorithms , Butterworth & Co, Image and Vision Computing, vol 7 no 2 May 1989, England.
- Nonin Ph. , 1992. Computer assisted production of planimetric data : an industrial approach, ISPRS Commission IV, Washington, August 1992, USA.
- Perlant F. Massonnet D. , 1992. Different SPOT DEM applications for studies in SAR interferometry, ISPRS Commission IV, Washington, August 1992, USA.
- Renouard L. , 1987. Création automatique de M.N.T. à partir de couples d'images SPOT, Congrès, SPOT 1, Utilisation des Images, Bilan, Résultats. CNES, France.
- Renouard L. , 1990. Experiences with automated terrain extraction from SPOT data, proceedings of the 10th Earsel symposium, EARSeL, Juin 1990, France.
- Renouard L. , 1991. Restitution automatique du relief à partir de couples stéréoscopiques d'images du satellite SPOT, Thèse, Ecole Polytechnique, Juillet 1991, France.