

EXTRACTION D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN AU DÉPART D'IMAGES STÉRÉOSCOPIQUES SPOT SUR LE BASSIN VERSANT DE L'OUED TASRAFETE

D. TAHIRI ⁽¹⁾, J-P. DONNAY ⁽²⁾, M. BINARD ⁽²⁾

*(1) Département de Cartographie et Photogrammétrie
I.A.V. Hassan II, B.P. 6202 Rabat-Instituts, Rabat, Maroc*

*(2) Laboratoire SURFACES, Université de Liège
7, place du XX août (B. A1-12), B-4000 Liège, Belgique*

RÉSUMÉ : Cette communication présente les résultats de la reconstitution automatique du relief à partir de deux scènes SPOT couvrant une zone montagneuse du nord du Maroc. Le système utilisé (module Digital Ortho de ERDAS) s'appuie sur le principe de la corrélation automatique qui, pour la recherche des points homologues, fonctionne hiérarchiquement à plusieurs niveaux de résolution. L'évaluation de la précision du MNT obtenu a été réalisée à l'aide de données altimétriques extraites des cartes topographiques existantes (échelle: 1/50 000) et a révélé une erreur moyenne quadratique de ± 15 m. Cette précision est suffisante pour rétablissement d'orthoimages ou pour l'interpolation des courbes de niveau pour des cartes topographiques aux échelles 1/100 000 et plus petites.

ABSTRACT : This paper deals with the results of automatic reconstitution of the relief from two SPOT scenes covering a mountainous area located in north Morocco. The system used (Digital Ortho module from ERDAS) is based on the automatic correlation principle which, for the research of homologous points, works hierarchically at different levels of resolution. The evaluation of the DEM accuracy was achieved according to elevation data issued from existing 1/50 000-scale topographic maps and an RMSE value of ± 15 m was obtained. This accuracy is sufficient for the production of orthoimages or for the interpolation of contours for topographic maps at 1/100 000 and smaller scales.

I - INTRODUCTION

L'imagerie satellitaire constitue une source riche et précieuse pour l'inventaire et l'aménagement des ressources naturelles. Depuis quelques années, le redressement géométrique des données numériques issues de l'imagerie satellitaire peut être réalisé avec une précision de l'ordre d'une fraction du pixel. Ceci implique des précisions planimétriques compatibles avec les échelles cartographiques 1/50 000 et 1/25 000 (Welch and Usery, 1984; Borgeson, 1985; Konecny, 1987). Cependant, la possibilité de dériver des données altimétriques à partir de l'imagerie satellitaire a été limitée par l'absence de données stéréoscopiques enregistrées avec un rapport base sur hauteur (B/H) convenable (Welch, 1983; Ehlers and Welch, 1987). Ce n'est que depuis le lancement du satellite SPOT (février 1986) que des applications altimétriques rigoureuses peuvent être envisagées. En effet, la haute résolution spatiale et la ca-

pacité particulière de visée latérale du satellite SPOT ont favorisé l'option d'engendrer des Modèles Numériques de Terrain (MNT) à partir de couples stéréoscopiques. Ces couples sont constitués par association de scènes couvrant une même région et prises sous des angles différents. Dans ce sens, nous présentons ici les résultats de la reconstitution automatique du relief à partir de deux scènes du satellite SPOT couvrant une zone du nord du Maroc. Le système utilisé (Module Digital Ortho de ERDAS) s'appuie sur le principe de la corrélation automatique qui, pour la recherche des points homologues, fonctionne hiérarchiquement à plusieurs niveaux de résolution. La validité du MNT ainsi obtenu (10 m de résolution) est réalisée à l'aide de données altimétriques extraites de cartes topographiques existantes. En plus des produits habituellement dérivés à partir des MNT (vues perspectives, courbes de niveau, etc.), une orthophoto (image corrigée des déplace-

ments planimétriques causés par le relief) d'une des deux images du couple stéréoscopique est obtenue grâce au MNT engendré dans le cadre de cette étude.

2 - DONNÉES SATELLITAIRES ET ZONE D'ÉTUDE

Le couple stéréoscopique étudié provient du satellite SPOT. Les scènes constituant ce couple (identifiées K35-J280) furent acquises le 13 et 14 août 1991 en mode panchromatique avec une résolution au sol de l'ordre de 10 m. Les angles de prises de vue sont respectivement $+23.4^\circ$ (image de gauche) et -9.3° (image de droite), ce qui correspond à un rapport B/H de 0.6. La valeur de ce rapport est décisive quant à la précision des résultats: un rapport relativement faible (<0.6) pénaliserait la précision des altitudes restituées (Welch, 1983). Les deux scènes sont du niveau 1B. Du fait que le système utilisé dans cette étude ne peut opérer que sur des images du niveau 1A, une transformation des deux images vers le niveau 1A s'est imposée. Le présent travail a été réalisé sur une station SUN IPX (24.4 specmarks) d'une mémoire vive de 32 MB avec un disque dur de 1.6 GB.

Les deux scènes couvrent une zone d'environ 60x72 km située dans le Rif marocain (chaîne montagneuse au nord du Maroc; le long du littoral méditerranéen).

Elle se situe dans la région de Zoumi (Latitude= $34^\circ 50'N$, Longitude= $5^\circ 05'W$), au nord de Fès et à l'est de Ouezzane. L'amplitude altimétrique est de 1583 m, s'étalant de 139 m à 1722 m. Le bassin versant de l'Oued Tasrafete occupe la partie centrale de la zone couverte par le couple stéréoscopique et s'étend sur une superficie approximative de 150 km².

3. RESTITUTION AUTOMATIQUE D'UN MNT À PARTIR D'UN COUPLE STÉRÉOSCOPIQUE SPOT

3.1. Méthodes classique et automatique

La photogrammétrie est la source principale de constitution des MNT. La méthode classique consiste à dériver l'information topographique, généralement sous forme de courbes de niveau, directement à partir des photographies aériennes à l'aide d'un

équipement spécifique (stéréorestituteur) piloté par un opérateur. Celui-ci utilise le fusionnement binoculaire pour identifier les paires de points homologues (points images d'un même détail au sol). Des coordonnées tri-dimensionnelles sont calculées pour chaque paire de points ainsi identifiée.

La méthode numérique se base sur une identification automatique des points homologues de deux images numériques formant un couple stéréoscopique. Un pixel p' de l'image de droite est admis comme homologue du pixel p de l'image de gauche, lorsque la fenêtre mobile centrée sur lui présente une ressemblance, ou corrélation, maximale avec la fenêtre fixe centrée sur p . Les coordonnées-terrain (X,Y,Z) du point au sol correspondant à chaque paire de points homologues sont calculées sur base d'un modèle mathématique. Ce dernier est établi à l'aide d'un certain nombre de points amers.

3.2. Description de la méthode utilisée

Nous présentons ici la méthode automatique numérique utilisée dans le module Digital Ortho de ERRAS. La méthode procède en quatre étapes principales de traitement à savoir:

- modélisation des deux vues;
- recherche des paires de points homologues;
- intersection au sol des rayons homologues;
- calcul du modèle numérique d'altitude.

4 - MODÉLISATION DES DEUX VUES

La modélisation d'une vue consiste à déterminer la position et l'orientation du capteur pendant la prise de vue. Sachant que le balayage de la surface du sol par la capteur se fait ligne par ligne, un centre de perspective et trois angles d'orientation doivent être considérés pour chaque ligne explorée. Quand le satellite se déplace d'une ligne à l'autre, ces paramètres varient. Vu le mouvement paisible du satellite le long de son orbite, ces variations sont réduites et peuvent être modélisées par des fonctions linéaires (Konecny, 1987; Erdas, 1992). Les centres de perspective des différentes lignes d'une scène sont considérés alors comme étant alignés.

Tenant compte des considérations précédentes, la modélisation d'une telle prise de vue se résume en la détermination de douze éléments pour chaque scène

à savoir :

- le centre de perspective relatif à la ligne centrale de la scène (X_0, Y_0, Z_0),
- les coefficients décrivant le changement de la position du centre de perspective le long de l'orbite (c_x, c_y, c_z),
- les trois angles d'orientation relatifs à la ligne centrale (ω, ϕ, κ), et
- les coefficients décrivant la variation de ces angles le long de l'orbite ($k_\omega, k_\phi, k_\kappa$).

Une position approchée et les variations d'orientation sont déjà connues grâce aux données auxiliaires SPOT acquises en orbite au moment de la prise de vue. A l'aide d'un certain nombre de points amers identifiables avec précision sur l'image, on calcule une position corrigée et l'orientation absolue des vues. Pour une meilleure mise en place d'une image par rapport à l'autre, le calcul est effectué simultanément pour les deux images à l'aide de points d'appui communs. Des équations de colinéarité modifiées sont établies et résolues par le principe des moindres carrés. Ces équations se présentent sous la forme suivante (Erdas, 1992) :

$$x_i = -f \frac{(r_{11})_i \cdot (X - X_{0i}) + (r_{21})_i \cdot (Y - Y_{0i}) + (r_{31})_i \cdot (Z - Z_{0i})}{(r_{13})_i \cdot (X - X_{0i}) + (r_{23})_i \cdot (Y - Y_{0i}) + (r_{33})_i \cdot (Z - Z_{0i})}$$

$$y_i = -f \frac{(r_{12})_i \cdot (X - X_{0i}) + (r_{22})_i \cdot (Y - Y_{0i}) + (r_{32})_i \cdot (Z - Z_{0i})}{(r_{13})_i \cdot (X - X_{0i}) + (r_{23})_i \cdot (Y - Y_{0i}) + (r_{33})_i \cdot (Z - Z_{0i})}$$

avec :

$$X_{0i} = X_0 + c_x \cdot y_i \quad Y_{0i} = Y_0 + c_y \cdot y_i \quad Z_{0i} = Z_0 + c_z \cdot y_i$$

$$\omega_i = \omega + k_\omega \cdot y_i \quad \phi_i = \phi + k_\phi \cdot y_i \quad \kappa_i = \kappa + k_\kappa \cdot y_i$$

où :

X, Y, Z = coordonnées-terrain des points d'appui

X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} = coordonnées-terrain du centre de perspective relatif à la ligne i

x_i, y_i = coordonnées-image relatives à la ligne i

f = distance focale pour capteur optique (1.084 mm)

$(r_{11})_i, (r_{12})_i$ = coefficients de la matrice de rotation (3x3) relative à la ligne i .

Le nombre d'inconnues (12) impose l'utilisation de 6 points amers. Selon Baltsavias (1992), 10 points amers fournissent une précision meilleure, alors

qu'un nombre de 30 points ne ferait qu'augmenter l'effort d'identification sans amélioration significative de la précision. Nous avons utilisé en total 22 points amers dont les coordonnées planes ont été numérisées à partir des cartes topographiques de base (1/50 000). L'altitude a été interpolée manuellement sur les mêmes cartes (équidistance = 20 m). Ces 22 points sont répartis en 17 points de contrôle utilisés dans l'ajustement et 5 points tests. Ces derniers permettent d'évaluer d'une manière indépendante la précision de l'ajustement. Ils sont utilisés dans le processus d'ajustement comme points inconnus. En plus, 46 paires de points homologues bien répartis ont été sélectionnés et leurs coordonnées sont déterminées par triangulation. L'ajustement a été achevé avec une déviation standard (σ_0) de ± 5.8 m. L'analyse de la précision basée sur les points-test a révélé une erreur moyenne quadratique de ± 9.9 m en X, de ± 12.0 m en Y et de ± 11.7 m pour les altitudes.

Les coordonnées-image sont mesurées avec une très grande précision (de l'ordre de 0.25 pixel). Cependant la précision des coordonnées-terrain des points amers est limitée par l'échelle de la carte de base qui est de 1/50 000. Tenant compte de ces considérations, des erreurs introduites par la numérisation et des erreurs inhérentes au support, la meilleure précision qu'on peut espérer sur les coordonnées fournies par ces cartes ne peut descendre en-dessous de 10 m. Ceci explique aisément les résultats obtenus.

Avant de passer à l'étape suivante, soit la recherche des points homologues, un prétraitement est souvent appliqué, principalement si les deux images constituant le couple sont fortement diachrones. Les différences radiométriques entachant ces images peuvent être réduites par des techniques telles que le filtrage ou le "data snooping" (Ehlers, 1982 et 1985; Rosenholm 1987 et 1988). Une autre alternative consiste à effectuer le processus de corrélation sur des images constituées de valeurs de gradient au lieu d'images de niveaux de gris (Debra, 1983; Baltsavias, 1992).

Les deux images utilisées dans le cadre de la présente étude ont été acquises le 13 et 14 août 1991 (1 jour de différence) et apparaissent de très bonne qualité. Par conséquent, un tel prétraitement s'est avéré inutile.

5 - RECHERCHE DES POINTS HOMOLOGUES

5.1. Différentes approches de corrélation

Pour déterminer des paires de points homologues dans les deux images constituant le couple stéréoscopique, deux approches peuvent être utilisées :

- une "correspondance zonale" ("area based matching") où la détermination des points homologues est basée sur une évaluation de la ressemblance de deux fenêtres centrées chacune sur l'un des deux homologues éventuels. Cette approche est relativement simple et permet une correspondance avec un haut degré de précision. Elle est cependant exigeante en temps de calcul (Hofmann, 1984; Gruen, 1986; Cappellini, 1991).

- une "correspondance structurale" ("feature-based matching") qui consiste à extraire séparément à partir de chaque image des éléments structuraux primaires et, ensuite, d'appliquer un critère de corrélation basé sur certaines propriétés particulières de ces éléments (Debra, 1983; Cappellini, 1991).

Nous nous limiterons, dans la description ci-après, aux méthodes de corrélation utilisées dans le cadre de notre étude. Ces méthodes adoptent le principe de "correspondance zonale".

5.2. "Correspondance zonale"

Pour évaluer la ressemblance entre une fenêtre de référence (fenêtre fixe centrée sur un pixel de l'image de gauche) et une fenêtre de recherche (fenêtre mobile centrée sur un pixel situé à l'intérieur d'une zone de recherche de l'image de droite), deux types de techniques peuvent être utilisées : la première considère un coefficient de corrélation calculé sur base d'une fonction de correspondance convenable, tandis que la deuxième fait appel à un algorithme itératif basé sur le principe des moindres carrés. Ces deux techniques sont décrites dans les paragraphes ci-dessous.

La définition des dimensions des fenêtres, d'une part, et de la zone de recherche, d'autre part, dépend principalement du relief et de la qualité des images (Debra, 1983; Ehlers, 1987). En effet, l'écart entre la position réelle du pixel recherché et sa position déformée est d'autant plus important que le terrain

est accidenté. Ainsi, pour un terrain à forte énergie du relief, la zone de recherche doit être assez grande pour pouvoir contenir le pixel recherché fort déplacé de sa position réelle.

5.2.1. Correspondance basée sur le coefficient de corrélation

Pour évaluer la ressemblance entre les deux fenêtres correspondantes, un coefficient de corrélation est calculé pour chaque pixel de la zone de recherche. Ce coefficient est déterminé sur base d'une fonction mathématique, la plus utilisée étant la fonction classique de "cross-correlation" qui se présente sous la forme suivante (Rosenholm, 1985)

$$R(k,l) = \frac{\sum_i \sum_j (Gr - Mr) (Gc - Mc)}{([\sum_i \sum_j (Gr - Mr)^2] \cdot [\sum_i \sum_j (Gc - Mc)^2])^{1/2}}$$

où :

$R(k,l)$: coefficient de corrélation au pixel (k,l)

i,j : dimensions des fenêtres

Gr, Mr : niveau de gris à la position (i,j) et sa moyenne dans la fenêtre de référence

Gc, Mc : niveau de gris et sa moyenne dans la fenêtre de recherche correspondante.

Cette fonction est nulle ($R=0$) pour une absence de correspondance et maximale ($R=1$) pour une ressemblance parfaite. Le coefficient de corrélation est calculé pour chaque pixel de la zone de recherche. Le pixel fournissant la valeur maximale pour ce coefficient est admis comme homologue du pixel de référence. Cette technique est relativement lente mais ne nécessite que de grossières approximations. Sa précision est de l'ordre d'un pixel (Cappellini, 1991).

5.2.2. Corrélation par moindres carrés

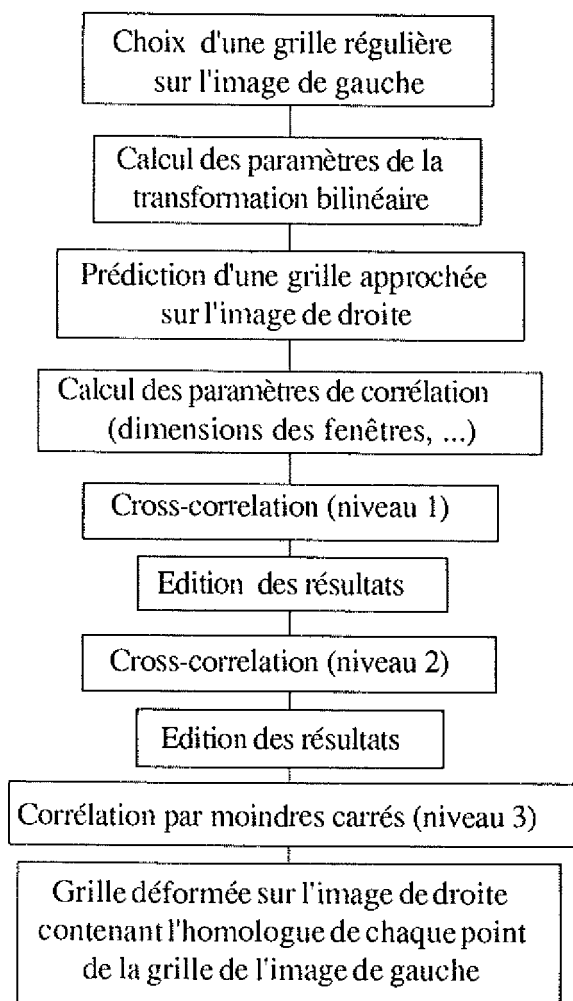
Cette technique est utilisée pour une correspondance précise des points homologues. Les différences de niveaux de gris entre la fenêtre de référence et la fenêtre de recherche sont utilisées comme observations pour un ajustement par moindres carrés. Le résultat consiste en des valeurs d'une translation permettant de déplacer la fenêtre de recherche vers la position réelle du point homologue recherché. La précision de cette méthode peut atteindre 1/10 du pixel. Cependant, de bonnes approximations sont

absolument nécessaires (Erdas, 1992).

5.3. Procédure suivie

Le processus de corrélation utilisé fait appel à la "cross-correlation" pour une correspondance du niveau pixel et à une corrélation par moindres carrés pour une correspondance raffinée au niveau sub-pixel. Chaque pixel est corrélé à quatre niveaux de résolution hiérarchisés. Le premier niveau garde sa résolution complète (1:1), Le deuxième est réduit par un rapport 1:2, le troisième par un rapport 1:4 et le quatrième de 1:8. Le processus de corrélation commence avec le niveau 4 (le plus grossier) et se termine au niveau 1 (le plus fin). Cette hiérarchisation pyramidale permet d'améliorer la vitesse d'exécution.

Le processus est appliqué sur des images d'environ 30x30 km. Les différentes étapes de ce processus sont décrites ci-après.



Le processus commence avec la définition d'une grille régulière (espacement = 160 pixels) sur l'image de gauche. Une correspondance approchée de cette grille sur l'image de droite est réalisée à l'aide d'une transformation bilinéaire. Les paramètres de cette transformation sont déterminés à partir des coordonnées images de quatre paires de points homologues sélectionnés manuellement. Les positions approchées serviront comme base pour le premier niveau de la "cross-correlation".

Après détermination des paramètres de corrélation (dimensions des fenêtres, seuil de corrélation, etc.), une correspondance par "cross-correlation" est réalisée pour un premier niveau de densité grossière. Avec une fenêtre de recherche de 18x18 (admettant un déplacement causé par le relief d'environ 140 pixels), et un nombre total de 272 points, 268 ont été corrélés avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.6. Ce qui représente une réussite de plus de 98%. Les résultats de cette correspondance peuvent être édités afin de corriger ou d'éliminer les "mauvaises" correspondances.

La "cross-correlation" est de nouveau appliquée sur les résultats obtenus au premier niveau pour passer à une grille relativement plus dense. Sur un nombre total de 3965 points, 3936 ont fournis un coefficient de corrélation supérieur à 0.6. Ce qui représente une réussite d'environ 99%. De la même façon que le niveau précédent, les "mauvaises" corrélations peuvent être édités.

Un troisième niveau de correspondance est réalisé à l'aide du processus de corrélation par moindres carrés permettant une densification et un raffinement de la grille précédente. Le résultat final est une grille déformée sur l'image de droite (effet du relief). La précision de positionnement des points de cette grille est de l'ordre de 0.25 pixel.

6 - INTERSECTION AU SOL DES RAYONS HOMOLOGUES

L'étape précédente nous a permis de déterminer les coordonnées-image d'un réseau dense de points homologues. L'intersection est une procédure qui permet le calcul des coordonnées-terrain à partir des coordonnées images et des paramètres d'orientation satellitaire. La détermination de ces derniers a fait l'objet de la modélisation (3.2.i). Les points

d'intersection résultant sont décrits par des triplets (X,Y,Z) dans le système de coordonnées cartographiques défini par les points de contrôle.

Etant donné les erreurs de conélation et celles dues à l'ajustement des deux vues, les rayons issus de deux points homologues n'aboutissent pas nécessairement en un point unique du terrain. Dans ce cas, la solution imaginée consiste à considérer comme point d'intersection le milieu du segment joignant au sol les extrémités des deux rayons homologues. Le seuil de tolérance relatif à l'écart entre ces deux rayons est choisi en fonction de la précision des points de contrôle et de celle exigée pour le MNT. Ce dernier est constitué par interpolation à partir des points d'intersection.

7 - CALCUL DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE

L'étape précédente conduit à un réseau irrégulier de points tridimensionnels. Pour passer à une grille régulière avec une résolution bien définie, et pour combler l'absence d'information altimétrique causée par de "mauvaises" corrélations ou par des écarts d'intersection inacceptables, une interpolation s'impose. La technique d'interpolation utilisée consiste à engendrer une surface continue à travers toute la zone étudiée. Un hyperboloïde est défini en chaque point de référence (point résultant de l'intersection). Ces fonctions sont ajustées de telle sorte que la somme de tous les hyperboloïdes représente un terrain idéal (Erdas, 1992),

Dans le but de réduire le temps d'exécution, la zone est subdivisée en un certain nombre de blocs (8 blocs pour une zone de 32x26 km). L'interpolation s'effectue indépendamment à l'intérieur de chaque bloc, tout en assurant un recouvrement entre les blocs voisins. L'absence de points de référence à l'intérieur d'un bloc est comblée par l'utilisation de ceux des blocs voisins. Cette solution n'est adoptée que pour les blocs situés à l'intérieur de la zone.

Le modèle altimétrique ainsi obtenu peut être utilisé pour réaliser des vues perspectives, pour interpoler les courbes de niveau ou pour engendrer une orthophoto numérique.

8 - EVALUATION DE LA PRÉCISION ALTIMÉTRIQUE DU MNT

Treize points bien répartis sur la zone d'intérêt ont été considérés pour évaluer la précision altimétrique du MNT. Leurs coordonnées planes ont été numérisées sur les cartes 1/50 000 (carte de base du Maroc, équidistance = 20m). Ce sont des points cotés ou des points appartenant à des courbes de niveau. Ainsi leurs altitudes ont été lues directement sur la carte sans faire appel aux interpolations. D'autre part, grâce à leurs coordonnées planes, ces points ont été localisés sur le MNT et leurs altitudes ont été enregistrées interactivement.

L'évaluation de la précision altimétrique du MNT, basée sur les 13 points tests ainsi considérés, résulte en une erreur moyenne quadratique de ± 15 m. Sachant que la précision altimétrique des points amers qui ont servi pour la modélisation du couple stéréoscopique est, dans les meilleurs des cas, de ± 10 m, ce résultat paraît tout à fait acceptable. Si on considère la relation proposée par Welch (1983) et Balce (1987) :

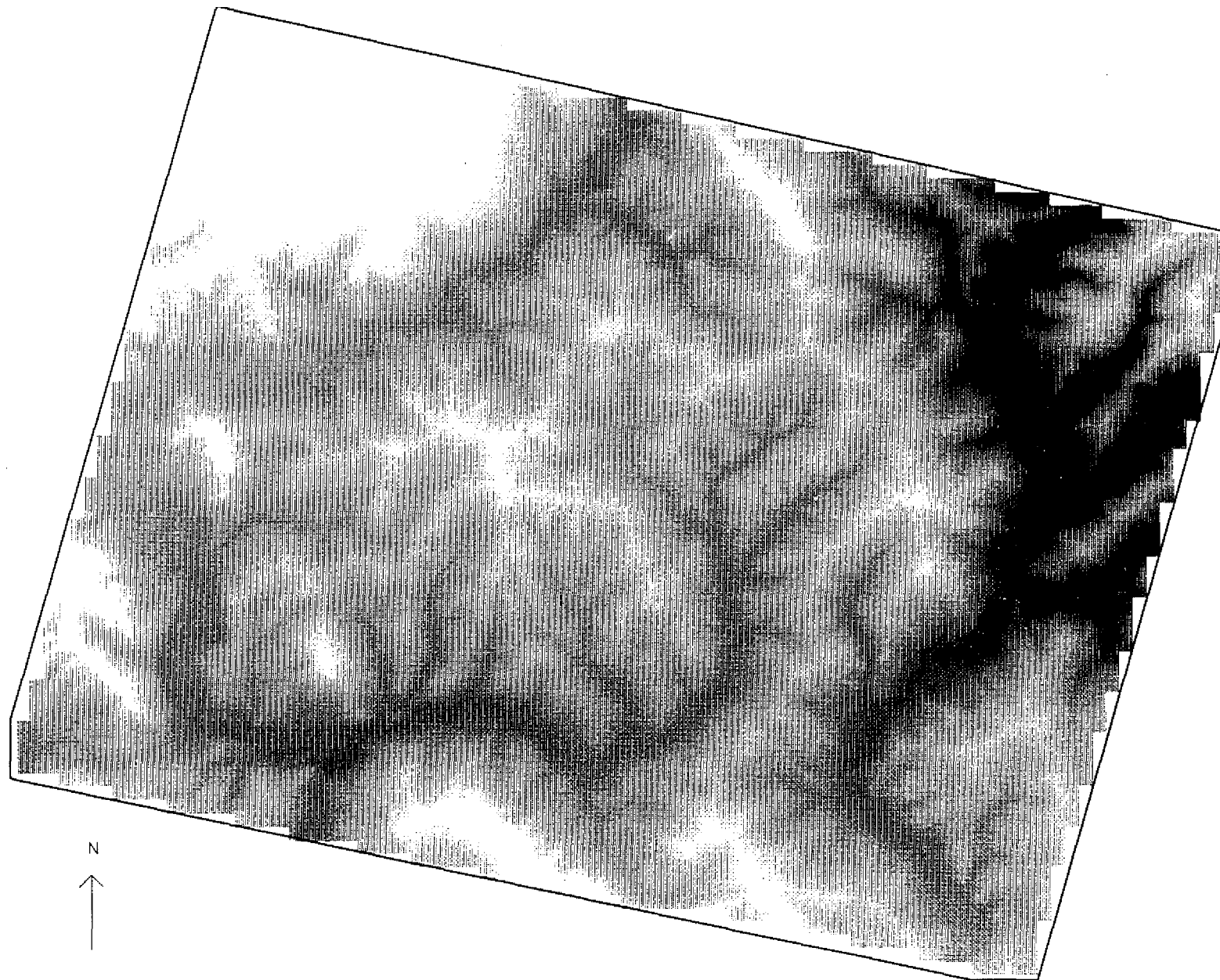
$$E_m = 3.3 \times \sigma_z$$

où E_m = équidistance minimale et σ_z = erreur moyenne quadratique affectant les points altimétriques, une représentation en courbes de niveau selon une équidistance de 50 m pourrait être déduite d'un tel MNT.

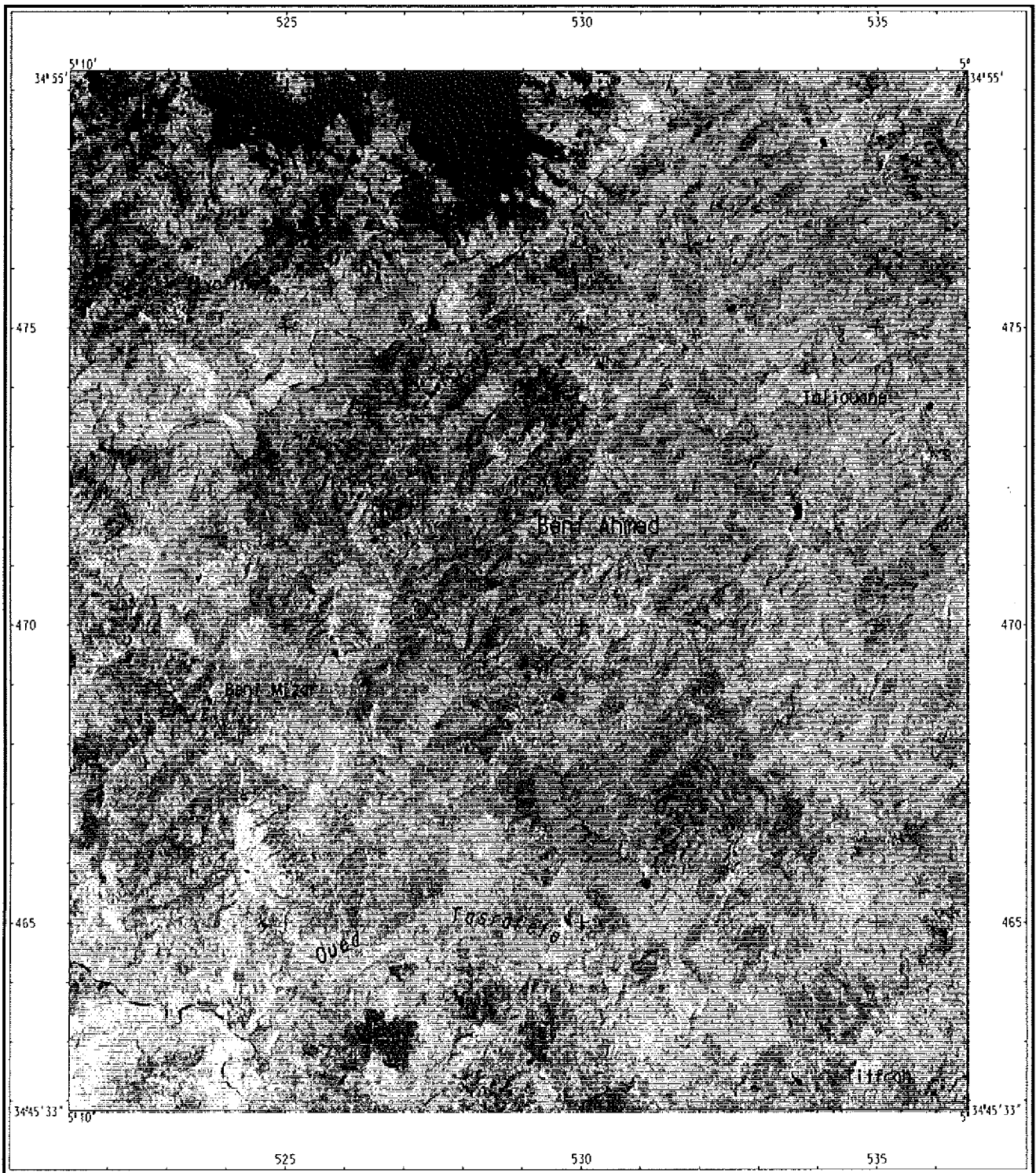
9 - ETABLISSEMENT D'UNE ORTHOPHOTO

L'enregistrement satellitaire des données relatives à la surface de la terre est influencé par le relief et par l'orientation du capteur par rapport au sol. Une orthophoto (ou orthoimage) est une image numérique corrigée des déplacements causés par le relief. Autrement dit, il s'agit d'un redressement ou d'une remise de l'image originale suivant une projection orthogonale. Un tel redressement peut être réalisé en combinant trois types de données: l'image originale, les paramètres d'orientation satellitaire relatifs à son acquisition et une description altimétrique (MNT) de la zone couverte par l'image.

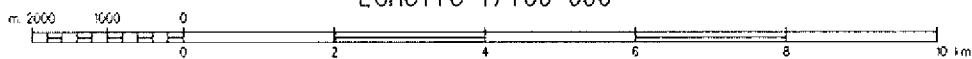
Une des deux images constituant le couple stéréoscopique peut être utilisée. Le choix de l'une ou de l'autre est basé principalement sur la qualité de



Representation en niveaux de gris du MNT (10m de resolution)
couvrant le bassin versant de l'Qued Tasrafete
Xmin = 516 km - Ymin = 457 km
Xmax = 548 km - Ymax = 483 km



Echelle 1/100 000



Source : SPOT Image KJ 35-280 (Panchromatique)
13 et 14 / 08 / 1991

Projection conique conforme de Lambert Nord-Maroc
Zone 1 - Origine Lat = 37 gr N - Long = 6 gr W
Ellipsoïde de Clarke 1880

Realisation : Laboratoire SURFACES
Universite de Liege, 1992

Module Digital Ortho ERDAS

l'image (contraste, nuages, etc.).

La technique utilisée dans le cadre de cette étude agit comme suit: pour chaque pixel du MNT, une position équivalente sur l'image satellitaire est retrouvée.

La valeur de niveau de gris relative à cette position est déterminé par un réchantillonnage sur base des pixels voisins. Outre la valeur de niveau de gris ainsi obtenue, l'altitude et l'orientation sont considérées pour la mise en place du pixel équivalant sur l'orthoimage.

Le choix de la technique de réchantillonnage dépend de l'utilisation ultérieure de l'orthoimage et du temps machine alloué à son établissement. Par exemple, un réchantillonnage suivant le plus proche voisin est conseillé pour une orthoimage qui sera utilisée comme document auxiliaire dans une classification supervisée. Pour une représentation cartographique, une convolution cubique donnerait un résultat meilleur.

La précision planimétrique de l'orthoimage ainsi obtenue a été évaluée à l'aide de 6 points bien identifiés sur les cartes 1/50 000 et sur l'orthoimage.

Des erreurs moyennes quadratiques de ± 19 ni en X et de ± 22 ni en Y ont été observées. Vu l'échelle de la carte de base, le nombre d'étapes que nécessite l'établissement d'une telle orthoimage et par conséquent les possibilités de propagation d'erreurs, nous considérons que les grandeurs d'erreurs obtenues comme acceptables. Une orthoimage reprenant une bonne partie du bassin versant de Tasrafete à l'échelle 1/100000 est ci-jointe.

10 - CONCLUSION

L'imagerie satellitaire constitue une source pour l'information altimétrique. Des modèles numériques de terrain peuvent être restitués à partir de données satellitaires de haute résolution spatiale à l'aide des techniques de corrélation automatique.

Dans la présente étude, un MNT de 10 m de résolution, couvrant le bassin versant de Tasrafete (nord du Maroc), a été restitué à partir d'un couple stéréoscopique SPOT (mode panchromatique) avec une erreur moyenne quadratique de ± 15 ni. Cette précision est suffisante pour l'établissement d'orthoimages ou pour l'interpolation des courbes de niveau pour des cartes topographiques aux échelles 1/100 000 et plus petites.

Il faut noter que les données satellitaires utilisées

dans le cadre de cette étude satisfont toutes les exigences permettant d'atteindre une précision altimétrique inférieure à 10 m à savoir (Welch, 1983; Gruen, 1986; Cappellini, 1991; Baltsavias, 1992) : B/H = 0.6, résolution spatiale de 10 m, précision des techniques d'autocorrélation utilisées de ± 0.25 pixel, etc. Cependant, la précision de calage du couple stéréoscopique ne pouvait descendre en dessous de 10m sachant que les points d'appui ont été numérisés sur des cartes topographiques au 1/50 000 (échelle de la carte de base du Maroc). Ceci limite l'utilisation du MNT et des produits qui en dérivent aux échelles 1/100 000 et plus petites. Pour pouvoir dériver, à partir de telles données satellitaires, une information altimétrique répondant aux exigences de précision des échelles relativement plus grandes, une étape de mesures sur le terrain (stéréopréparation) est indispensable. Evidemment, une telle étape augmenterait le coût et le temps de réalisation. L'utilisation des nouvelles techniques de positionnement par satellite, tel le GPS (Global Positioning System), pourrait remédier à de tels désavantages.

L'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale combinée avec des mesures GPS constitue un atout important pour l'établissement de bases de données altimétriques pour les pays en voie de développement.

BIBLIOGRAPHIE

BALCE A. E. (1987), Determination of optimum sampling interval in grid digital elevation models (DEM) data acquisition, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 3, pp. 323-330.

BALTSAVIAS E.P. AND STALMANN D. (1992), From satellite images to GIS with digital photogrammetry using SPOT data, *Proceedings of EGIS'92 - Munich*, EGIS Foundation, Utrecht/Amsterdam, pp. 945-946.

BORGESON W., BATSON R. AND KIEFFER H. (1985), Geometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 12, pp. 1893-1898.

- CAPPELLINI V., ALPARONE L., GALLI G., LANGE P. (1991), Digital Processing of stereo images and 3D reconstruction techniques, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 12, No. 3, pp. 477-490.
- DEBRA L., KENNETH R. AND DONALD G. (1983), Hierarchical Stereo Matching, *Proceedings of the conference on techniques for extraction of information from remotely sensed images*, August 16-19, pp. 28-37.
- EHLERS M. (1982), Increase in correlation accuracy of remote sensing imagery by digital filtering, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 3, pp. 415-420.
- EHLERS M. (1985), The effects of image noise on digital correlation probability, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 3, pp. 357-365.
- EHLERS M. AND WILCH R. (1987), Stereocorrelation of Landsat TM images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 9, pp. 1231-1237.
- ERDAS (1992), Manuel d'utilisation de Digital Ortho d'Erdas, 198 p.
- GRUEN A. AND BALTSAVIAS E. (1986), High precision image matching for digital terrain model generation, *International Archives of Photogrammetry*, No. 26, pp. 284-296.
- HOFMANN O., NAVÉ P. AND EBNER H. (1984), DPS-A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 8, pp. 1135-1142.
- KONICNY G., LOHMANN P., ENGEL H. AND KRUCK E. (1987), Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 9, pp. 1223-1230.
- PERLANT F., LUO W, MAITRE H. ET BARDINET C. (1988), Stéréorestitution sur imagerie SPOT d'une zone de Burundi, *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, Tome 22, Fascicule 1-2, pp. 77-95.
- RIAZANOFF S., JULIEN P., CERVILLE B. ET CHOROWICZ J. (1992), Extraction et analyse automatiques d'un réseau hiérarchisé de talwegs. Application à un modèle numérique de terrain dérivé d'un couple stéréoscopique SPOT, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 3, No.2, pp. 337-364.
- ROSENHOLM D. (1985), Digital matching in simulated SPOT images, *In Fotogrammetrisk Meddelanden*, Vol. 2, No. 50, pp. 1-76.
- ROSENHOLM D. (1987), Multi-point matching using the least-squares technique for evaluation of three-dimensional models, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 4, pp. 621-626.
- ROSENHOLM D. (1988), Multi-point matching along vertical lines in SPOT images, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, Nos. 10 and 11, pp. 1687-1703.
- WELCH R. (1983), Impact of geometry on height measurements from MLA digital image data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 10, pp. 1437-1441.
- WELCH R. AND USERY E.L. (1984), Cartographic accuracy of Landsat-4 MSS and TM data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-22, No. 3, pp. 281-288.

Remerciements

Cette communication rend compte de travaux réalisés dans le cadre commun des conventions "Téledétection IN 1433911" et "Stage 13139/20" de l'Administration Générale de la Coopération au Développement et du "Programme national de recherche en télédétection spatiale -Unité TELSAT/II/06" des Services de Programmation de la Politique Scientifique de Belgique. Nos remerciements s'adressent également à la firme GeoPerfect, distributeur ERDAS, qui nous a confié le module Digital Ortho. La responsabilité scientifique est assumée par les auteurs.