

CORRELATION NUMERIQUE D'IMAGES QUELCONQUES SELON LES LIGNES QUASI-EPIPOLAIRES, PAR APPROXIMATIONS SUCCESSIVES.

par G. de MASSON d'AUTUME

Ingénieur général géographe honoraire

France

Commission III, Groupe de travail III/4

1. Introduction

Bien que conçue et mise au point en vue des traitements des images du satellite SPOT, dont le lancement est prévu pour 1985, la procédure décrite est tout à fait générale ; ses caractéristiques principales sont :

- un ré-échantillonnage préalable des deux images réduisant au minimum leurs différences et tel que l'homologue d'un point quelconque de l'image 1, se trouve sur la ligne de même numéro de l'image 2 ;
- une procédure d'approximations successives au cours de laquelle les deux images subissent des corrections géométriques et radiométriques, jusqu'à devenir pratiquement identiques ;
- la possibilité de traiter des images ayant des propriétés radiométriques totalement différentes, par réduction aux contours ;
- l'utilisation systématique de l'interpolation par grille élastique pour le filtrage des mesures aberrantes et la reconstitution des portions de surface dépourvues d'accidents.

2 - Ré-échantillonnage selon les lignes quasi-épipolaires [2]

2.1 - Théorie générale (fig.1)

Les deux images sont ré-échantillonnées de telle façon que, si un point quelconque de l'espace-objet a pour coordonnées-pixel i_1, j_1 , et i_2, j_2 , la quantité $(i_2 - i_1)$ est du second ordre par rapport à la parallaxe $P = (j_2 - j_1)$.

Un tel ré-échantillonnage est toujours possible, même en l'absence de points connus. Soit en effet un jeu de valeurs des paramètres de prise de vues tel que les rayons homologues s'intersectent ; c'est le cas des valeurs exactes des paramètres, généralement inaccessibles, mais tout jeu satisfaisant la condition d'intersection fait aussi bien l'affaire. Le lieu des points d'intersection est une surface S . Soit S_0 une surface régulière voisine de S ; selon l'étendue de la zone à traiter et la forme de S , S_0 peut être un plan, un cylindre, une sphère, etc ...

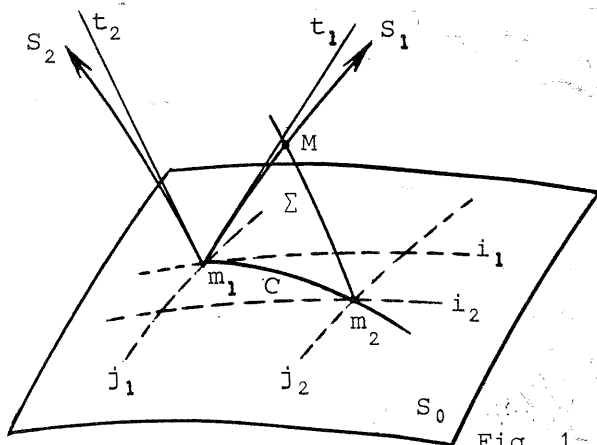


Fig. 1

Soit un système de coordonnées i, j défini sur S_0 , tel que les lignes $i = ct$, soient tangentes en tout point m à la droite mt intersection du plan tangent à S_0 en M avec le plan $mt_1 t_2$ des tangentes aux deux rayons passant par M . Les valeurs entières de i, j définissent une grille de ré-échantillonnage. Pour chaque noeud de cette grille, la loi de formation d'image permet de calculer les coordonnées-pixel p, q de l'image d'origine et la densité δ_{ij} est interpolée pour p, q (on peut aussi prendre la densité du plus proche pixel).

Soit alors M un point-objet quelconque, $m_1(i_1, j_1)$ et $m_2(i_2, j_2)$ les points d'impact sur S_0 des rayons (1) et (2) passant par M . Si M se déplace sur le rayon (1) en tendant vers m_1 , le rayon (2) engendre une surface Σ dont

l'intersection avec S_0 est une courbe C . Le plan tangent à Σ en m_1 contenant les deux tangentes $m_1 t_1$ et $m_2 t_2$ aux deux rayons, la courbe C est tangente en m_1 à la courbe $i = i_1$, ce qui démontre la proposition.

Il est toujours possible de choisir une surface S telle que $(j_2 - j_1)$ soit assez petit pour que $(i_2 - i_1)$ soit négligeable : il suffit pour cela, par exemple, de prendre comme surface S_0 une surface bi-dimensionnelle passant par N points régulièrement distribués sur S . En augmentant N on peut réduire à volonté l'écart entre les deux surfaces.

2.2. Le cas des images SPOT

2.2.1. Correction des paramètres de prise de vues

Les paramètres sont la position S du satellite et les 3 angles t, r, l , (tangage, roulis, lacet) qui définissent l'attitude du satellite par rapport au repère orbital.

Les éphémérides donnent de minute en minute, les vecteurs S et V sur lesquels est construit le repère orbital. Par ailleurs les vitesses de rotation autour des axes de tangage, roulis, lacet sont enregistrées à la période de 0,125 seconde, et leur intégration numérique donne les paramètres d'attitude à une constante près, ce qui permet de calculer en fonction du temps la matrice d'orientation absolue R . Les corrections cherchées sont dS et dR . On choisit N points de triangulation dont les coordonnées-pixel p et q sont mesurées au stéréocomparateur, ou par corrélation automatique avec exploration bi-dimensionnelle. Pour chaque rayon, on peut alors écrire les deux équations d'observations linéaires :

$$A dP + B dS + C dR = \begin{vmatrix} p' - p \\ q' - q \end{vmatrix}$$

ou p' et q' sont les coordonnées-pixel calculées à partir des coordonnées P du point visé. Avec les simulations établies par le C.N.E.S. et pour des segments de 100 secondes, soit environ 700 km, dS et dR peuvent être représentés en fonction du temps par des polynômes de degré 1 et 2 respectivement. Chaque équation d'observation comporte donc 18 inconnues, soit trois inconnues dP , six coefficients pour dS et neuf pour dR . S'il existe des points connus il suffit d'ajouter pour chacun d'eux les équations d'observation $dP = 0$. En leur absence, le système est évidemment indéterminé mais de toute façon il est très mal conditionné ; par suite de la petitesse de l'angle de champ les inconnues dS et dR sont très fortement corrélées. Pour y remédier, il suffit d'introduire des équations d'observations fictives pondérées, exprimant que les coefficients de dS et dR sont nuls. Les poids doivent être assez petits pour que les résidus des équations d'observations n'en soient pas sensiblement affectés.

2.2.2. Procédure de ré-échantillonnage (fig. 2)

Dans l'imageur de SPOT, les rayons correspondant à une ligne d'image sont des droites contenues dans un plan appelé plan de visée. Le plan de visée passant par un point M fait avec la verticale de M un angle qui ne dépasse pas quelques degrés. Sa trace sur l'ellipsoïde fait avec la trace du rayon central un angle voisin de 90° . Si le point M appartient à deux segments et si S_1 et S_2 sont les positions correspondantes du satellite, les traces des deux plans de visée font avec la trace du plan $MS_1 S_2$ des angles petits, sauf aux latitudes très élevées. La zone de recouvrement a la forme d'un losange très allongé.

Soit C le centre de courbure moyen de l'ellipsoïde pour la zone à traiter et S_m une sphère centrée sur C de rayon R_m égal à la moyenne des distances CP pour les N points utilisés pour la correction des paramètres de prises de vues. Soit O l'intersection de S_m et de la normale à l'ellipsoïde

issue de C, et OT l'intersection du plan tangent en O à S_m avec le plan $OS_1 S_2$ des deux rayons issus de O. Il est indiqué de prendre comme surface S_0 le cylindre tangent à S_m dont les génératrices sont parallèles à OT. La position d'un point quelconque de S_0 est défini par les coordonnées cylindriques x et Y , y étant mesuré sur le grand cercle de contact et x sur les génératrices. Les lignes quasi-épipolaires tracées sur S_0 seront très voisines des lignes $y = ct$.

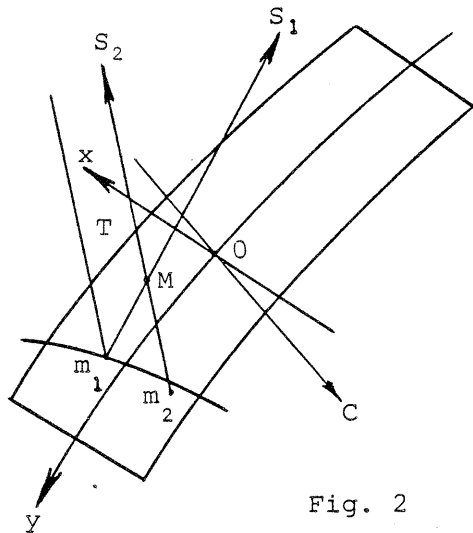


Fig. 2

Pour chaque noeud N d'une grille x , y au pas de 1 km, on calcule les coordonnées géocentriques $X Y Z$, puis les coordonnées-images p_1, q_1, p_2, q_2 et la quantité $\tan \gamma/2$, γ étant l'angle que fait l'intersection du plan $NS_1 S_2$ des deux rayons et du plan tangent sur N à S_0 avec la génératrice.

Le calcul du ré-échantillonnage se fait ligne par ligne. Pour chaque ligne i , les coordonnées x, y du point de ré-échantillonnage i, j se déduisent de celles du point $i, j-i$ par les formules :

$$x(i, j) = x(i, j - 1) + P \cos \gamma$$

$$y(i, j) = y(i, j - 1) + P \sin \gamma$$

P étant le pas du ré-échantillonnage ; $\sin \gamma$ et $\cos \gamma$ sont calculés à partir de $\tan \gamma/2$ interpolé pour x, y .

Le point de départ de la ligne i se déduit de celui de la ligne précédente par les formules :

$$x(i, 1) = x(i-1, 1) - P \sin \gamma$$

$$y(i, 1) = y(i-1, 1) + P \cos \gamma$$

Les coordonnées-pixel p_1, q_1, p_2, q_2 des images d'origine sont interpolées pour x, y dans les modèles numériques et les densités δ_1 et δ_2 interpolées pour p, q . Cette interpolation peut-être bi-linéaire sur quatre pixels, ou bi-cubique sur 16 pixels.

Une procédure plus rapide consiste à calculer d'abord les modèles de déformation [3] donnant p_1, q_1, p_2, q_2 en fonction de i, j pour une grille au pas nP , n étant par exemple égal à 50 ; il suffit pour cela de remplacer P dans les formules précédentes. Les p, q sont ensuite interpolés pour i, j dans ces modèles et les densités interpolées pour p, q .

Dans le cas de SPOT, l'angle que fait le rayon Mm_2 avec le plan $S_1 m_1 S_2$ (fig. 2) est petit. Pour un écart Mm_1 de 2000 m, il est de l'ordre de 10^{-4} et l'écart entre m_2 et la ligne épipolaire passant par m_1 reste inférieur au mètre.

Les lignes E se comparent donc exactement comme des lignes épipolaires, pour les dénivelées les plus fortes qu'on puisse rencontrer.

3. Corrélation sur une ligne

3.1. Calcul du coefficient de ressemblance

Pour chaque ligne i , le calcul de la parallaxe $p(i, j)$ se fait en recherchant le maximum d'un certain coefficient de ressemblance entre une fenêtre fixe centrée sur le pixel (i, j) de l'image (1), comportant $N_x \times N_y$ pixels, et une fenêtre mobile de même dimension de l'image (2), centrée sur le pixel (i, j') , j' variant de $j - (N/2)$ à $j + (N/2)$, le nombre de pas d'exploration étant N , supposé impair. Le coefficient de ressemblance se calcule sur les valeurs d'une ou de plusieurs fonctions définies pour chaque pixel, par exemple la densité, la norme du gradient de densité, les composantes en x et en y du vecteur gradient de densité, etc ...

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le coefficient de corrélation classique :

$$C = \text{Covariance} / \sqrt{\text{var. (1)} \times \text{var. (2)}}$$

3.2. Recherche du maximum de corrélation

Le calcul donne, pour chaque valeur de j , n valeurs $C(j')$. Une procédure simple recherche le maximum de la fonction $C(x)$, prenant les valeurs $C(j')$ pour $x = j'$. Si x_{max} est l'abscisse du maximum et C_{max} sa valeur, la parallaxe est égale à $x_{\text{m}} - j$ et le poids Q qui lui est attribué est le produit de C_{max} par la courbure en x_{m} de la fonction $C(x)$. S'il n'y a pas de maximum, ou plusieurs maximums dont aucun n'est prépondérant, ou si C_{max} est négatif, la parallaxe est prise égale à 0 avec un poids nul.

4. Filtrage et lissage de la fonction parallaxe

Le modèle numérique $P(i, j)$ de la fonction parallaxe brute ainsi obtenue est filtré et lissé par la procédure de la grille élastique [1]. Aux équations d'observation $P(i, j) = x_{\text{m}}(i, j) - j$ affectées du poids $Q(i, j)$ on ajoute les équations "de régularité" :

$$P(i, j-1) - 2P(i, j) + P(i, j+1) = 0$$

$$\text{et } P(i-1, j) - 2P(i, j) + P(i+1, j) = 0$$

affectées du poids 1.

Le système est résolu par la méthode des gradients conjugués au moyen d'un A.P. (Processeur de tableaux). L'A.P. utilisé ne pouvant traiter que des blocs de 10 000 pixels au maximum, le modèle numérique est décomposé automatiquement en blocs de 100×100 , avec des recouvrements assurant la continuité. Un premier passage sert à éliminer les mesures aberrantes, auxquelles est attribué un poids nul. Le deuxième passage donne les résultats définitifs.

5. Ré-échantillonnage de l'image (2) avec correction de la parallaxe et harmonisation des densités

L'image (2) peut être corrigée ligne par ligne en fonction de la parallaxe en affectant au pixel j de l'image corrigée la densité δ interpolée pour $j + P(i, j)$. Il est toutefois préférable, pour éviter une cascade de ré-échantillonnages nuisibles à la qualité de l'image, d'opérer la correction à partir de l'image d'origine. Pour une ligne i quelconque, l'interpolation dans le modèle de déformation donne les coordonnées-pixel p, q de l'image d'origine correspondant au pixel $j + P(i, j)$ et la densité interpolée pour p, q est affectée en pixel j de l'image corrigée.

On peut profiter du ré-échantillonnage pour harmoniser les densités de l'image (1) avec celles de l'image (2) en leur appliquant une correction de densité moyenne $\Delta(i, j)$ et une correction de contraste $K(i, j)$ selon la formule :

$$\delta(i, j) + \Delta(i, j) + \delta.K(i, j)$$

Les fonctions Δ et K étant définies par deux modèles numériques calculés par moindres carrés et pouvant être construits sur la même grille que le modèle de déformation géométrique.

Après correction, les parallaxes subsistant entre les deux images (fig. 3) ne représentent plus que les imperfections de la fonction parallaxe utilisée. Au stade suivant, le nombre de pas d'exploration pourra être considérablement réduit. En outre la corrélation sera bien meilleure, même avec des fenêtres relativement grandes, et le pic du maximum de corrélation beaucoup plus accusé.

La procédure d'approximations successives permet de tenir un compte exact des déformations dues au relief, sans qu'il soit nécessaire de modéli-

ser celui-ci au moyen d'une fonction arbitrairement choisie.

6. Calcul de la première approximation

Un modèle numérique approché de la fonction parallaxe peut être obtenu très rapidement en groupant les pixels par blocs $N \times N$, chaque bloc étant considéré comme un pixel fictif auquel est affecté la moyenne des densités des N^2 pixels composants. Le nombre de pixels étant divisé par N^2 et le nombre de pas d'exploration par N , le temps de calcul est divisé par N^3 . Ceci a en outre l'avantage d'éliminer les difficultés dues aux structures périodiques fines.

7. Réduction des images aux contours (fig. 3)

Si les deux images ont des caractéristiques radiométriques très différentes, par exemple si elles ont été enregistrées dans des bandes spectrales ou à des époques différentes, la corrélation des densités est impossible. La seule solution est alors de réduire ces images aux contours, ceux-ci étant définis comme des lignes de crête de la fonction gradient de densité.

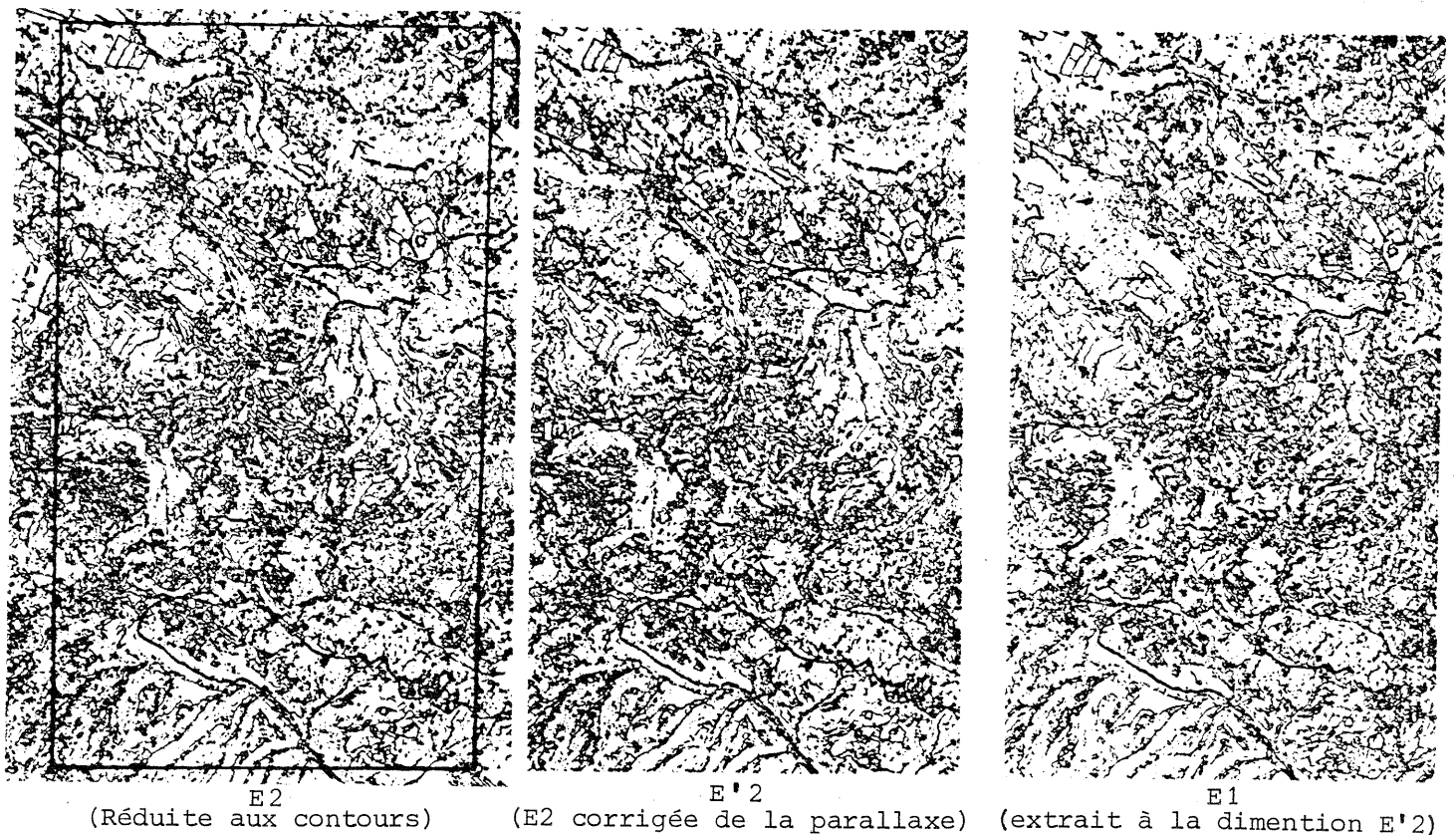


Fig. 3 - Images réduites aux contours (1ère approximation)

La réduction aux contours peut se faire par un algorithme très simple : il suffit d'affecter à chaque pixel (i, j) la valeur 1 si les trois inégalités :

$$\begin{aligned} |\delta_{j+1} - \delta_{j-1}| &> |\delta_j - \delta_{j-2}|, & |\delta_{j+1} - \delta_{j-1}| &> |\delta_{j+2} - \delta_j|, \\ |\delta_{j+1} - \delta_{j-1}| &> 1 \end{aligned}$$

ou les inégalités analogues obtenues en remplaçant j par i , sont vérifiées simultanément, et la valeur 0 dans le cas contraire.

La valeur de 1 est choisie pour que la proportion de 1 soit comprise entre 15 et 20 %. Les images binaires ainsi obtenues peuvent être matérialisées au moyen d'une imprimante électrostatique. L'examen stéréoscopique montre que ces images donnent une impression de relief saisissant et peuvent donc être corrélées.

Dans le cas de pixels "concentrés" un mode de traitement très simple est d'attribuer à chaque pixel une "densité" égale au nombre de 1 qu'il contient.

En l'absence de concentration, la corrélation de matrices binaires pose toutefois des problèmes : si l'on adopte comme coefficient de ressemblance C le nombre de 1 en coïncidence, on risque de trouver des nombres très faibles, et une courbe $C(x)$ sans aucune continuité et comportant plusieurs maximums de même valeur.

Une solution simple est de remplacer la fonction "peigne" par une fonction "scie" en affectant par exemple la valeur +10 au pixel (i, j) , +3 aux pixels $j-1$ et $j+1$ et +1 aux pixels $j-2$ et $j+2$.

8. Passage du modèle numérique de la parallaxe au M.N.T.

Si les paramètres de prise de vues ont été calculés avec trois points connus au moins, on peut calculer, pour chaque pixel i, j , les coordonnées-terrain x, y, z de l'intersection des deux rayons. L'ensemble des points calculés est un M.N.T. construit sur une grille régulière en i, j , mais irrégulière en x, y . Pour obtenir un M.N.T. régulier, une méthode simple consiste à densifier le M.N.T. irrégulier par interpolation linéaire, au pas de $1/N$, en divisant les x, y par le pas P du M.N.T. régulier souhaité et en conservant seulement les parties entières m et n .

Soit alors deux lignes consécutives densifiées et K le numéro de colonne.

Si $m(1,k) \neq m(1, k+1)$ ou $m(1, k) \neq m(2, k)$ cela veut dire que le noeud $(1, k)$ de la grille densifiée est sur le profil $x = mP$ du M.N.P. avec une erreur inférieure à $1/N$ pixels.

Si $n(1, k) \neq n(1, k+1)$ ou $n(1, k) \neq n(2, K)$ cela veut dire que le noeud $(1, k)$ est sur le profil $y = nP$.

Si les deux conditions sont vérifiées simultanément, alors le noeud $(1, k)$ est le noeud (m, n) du M.N.T. et son altitude est la valeur de Z densifiée.

Le M.N.T. n'ayant de toute façon qu'une précision planimétrique de l'ordre du pixel, il est inutile de densifier au delà de $N = 4$.

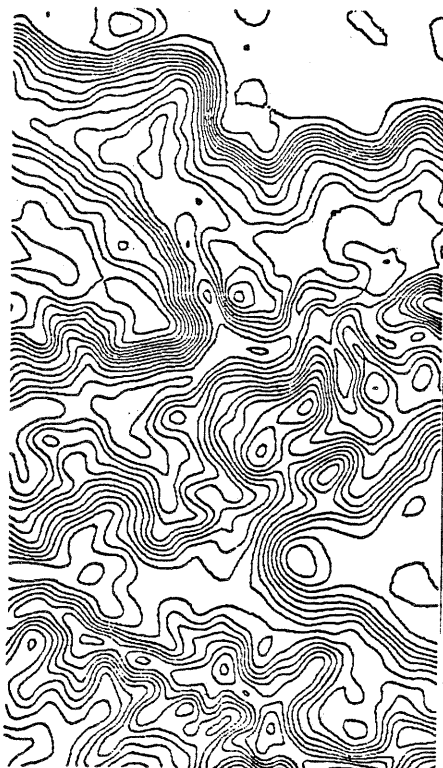
Le calcul peut être très rapide si l'on dispose d'un A.P. de capacité suffisante, avec un bon programme de génération de fonctions. La même procédure peut aussi s'appliquer au ré-échantillonnage, à l'inversion d'un modèle numérique, au tracé de courbes de niveau, etc ...

9. Expérimentation

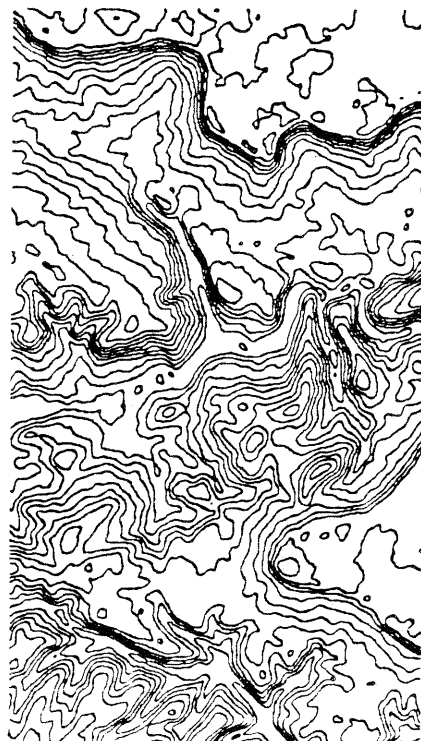
Les simulations SPOT disponibles ayant été réalisées à partir d'une même orthophotographie, la corrélation aurait été peu probante ; les essais ont donc été faits avec deux photos aériennes au 1:60 000, numérisées au pas de 0,05 mm, soit 12 mètres. Il s'agit d'un terrain assez difficile, comportant 400 m de dénivelée et des faïsses abruptes, boisé et contenant peu de détails géométriques. Le ré-échantillonnage épipolaire a été exécuté par redressement numérique sur un plan parallèle à la base.

La première itération a été faite sur des pixels concentrés 3×3 ou 5×5 , avec ou sans réduction aux contours, avec des fenêtres d'exploration de 5×5 ou 3×5 et 9 pas d'exploration. Elle fournit très rapidement une

bonne approximation de la fonction parallaxe (fig. 4), assez remarquable compte tenu de la dimension des pixels (36 ou 60 m) et de la faible quantité d'information utilisée, surtout pour les images binaires.



courbes d'isovaleurs
de parallaxe épipolaire
1ère approximation



courbes d'isovaleurs de
parallaxe épipolaire corrigées
2ème approximation

Figure 4

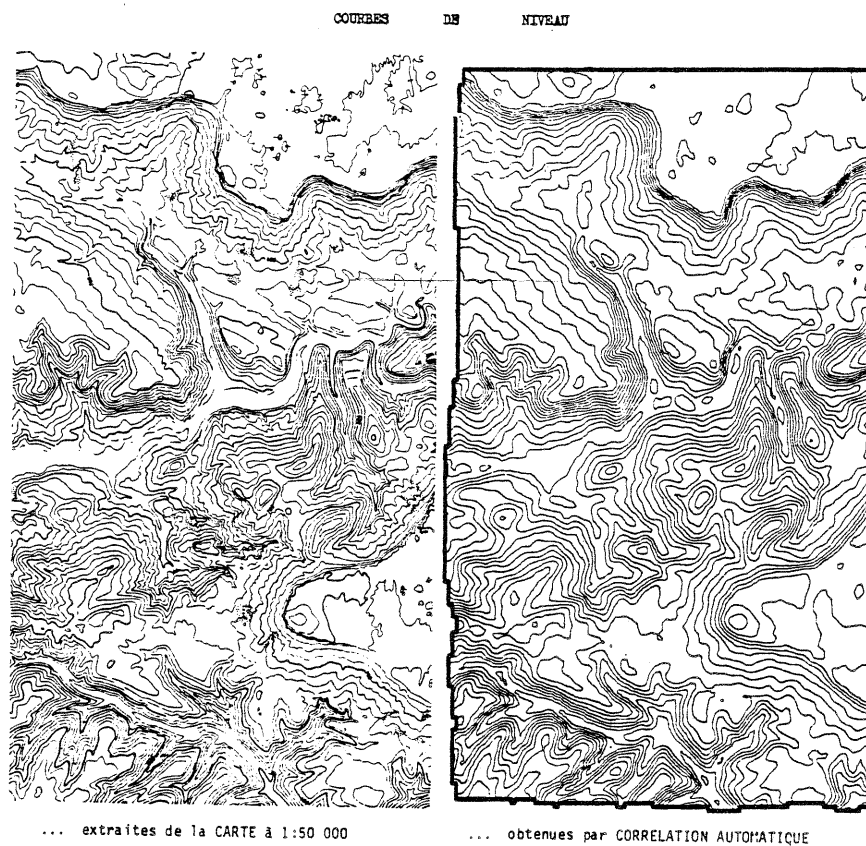
La deuxième itération a été faite avec les mêmes dimensions de fenêtre, mais sans concentration, et 7 pas d'exploration. La comparaison avec la restitution sur TRASTER des photos d'origine montre qu'on peut tracer des courbes de niveau satisfaisantes avec une équidistance égale à deux fois la dimension des pixels (fig. 5).

10. Conclusion

Les résultats obtenus permettent d'envisager le traitement automatique, sans supervision humaine, des images numériques enregistrées par satellites, pour l'établissement de cartes à moyenne échelle, et la possibilité, même en l'absence de points connus, de faire une comparaison pixel par pixel entre deux images d'une même région et de détecter les changements intervenus.

Remerciements

L'I.G.N. (Paris) a mis à ma disposition le matériel expérimental et les moyens de calcul nécessaires. M. Jehad H. HIJAZI s'est chargé d'une grande partie de l'expérimentation comportant l'étude de nombreuses variantes, l'optimisation des paramètres et le contrôle des résultats par comparaison avec le M.N.T. obtenu par restitution au TRASTER des clichés originaux.



Equidistance = 20 m

Figure 5

Bibliographie

- [1] G. de MASSON d'AUTUME 1978 - *Surface modelling by means of an elastic grid*, symposium S.I.P., commission III, Moscou.
- [2] G. de MASSON d'AUTUME 1979 - *Le traitement géométrique des images de télédétection*, Bulletin S.F.P.T., n° 73-74.
- [3] G. de MASSON d'AUTUME 1980 - *Application des modèles numériques au traitement géométrique des images*, Congrès S.I.P. de Hambourg.