

F.M. 5-7

DETECTION DU RELIEF DE FRACTURES
METALLIQUES PAR CORRELATION NUMERIQUE D'IMAGES

J. BEUCHER
Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, France
T. HERSANT
I.R.S.I.D., Saint-Germain-en-Laye, France



ABSTRACT

The texture analyser permits the automatic detection of the relief of metallic fractures by numerical correlation of two stereoscopic images. This correlation is performed on the high gradient values of the pictures. The analyser detects the gradients and provides two binary images which are locally correlated, by laying a measurement mask over them. We also present an algorithm which corrects, using correlations, the vertical shift between the images. After a brief review of the methods applied here, we describe the algorithms and some procedures for eliminating false results due to the bad detection of the homologous zones or to the noise on the two pictures.

INTRODUCTION

L'utilisation d'images stéréoscopiques dans la reconstitution d'un relief, est d'usage courant. Mais les calculs de points cotés deviennent très fastidieux si le procédé n'est pas automatisé. Une étude entreprise par le Centre de Morphologie Mathématique (Ecole des Mines de Paris) et l'I.R.S.I.D. (St-Germain-en-Laye) se proposait d'analyser des fractures métalliques d'acier doux par ce procédé, et notamment de reconstituer le relief de la fracture au moyen de l'analyseur de texture du C.M.M.. Nous ne donnerons ici qu'une rapide description des méthodes utilisées. En effet, ces méthodes ne sont que l'application de la morphologie mathématique au problème qui nous intéresse. Elles sont, de plus, tributaires de la technologie de l'analyseur de textures, et notre propos n'est pas de rappeler ici les principes de base de la morphologie mathématique. Le lecteur voudra bien se reporter à des ouvrages de référence pour plus ample information sur les outils employés dans cette étude.

NOTATIONS ET DESCRIPTION DES PROCÉDES

1) Images stéréoscopiques

Rappelons brièvement le principe de la méthode d'analyse stéréoscopique d'un relief. Un échantillon donné (présentement, une surface de rupture d'acier) est observé et photographié sous deux perspectives différentes. On peut, entre chaque image effectuer une translation de l'objet, ou bien, et c'est le cas ici, une rotation autour d'un axe. L'échantillon est d'abord photographié lorsque l'angle de rotation est ϕ_0 , puis on prend un deuxième cliché sous un angle

$$\phi_1 = \phi_0 + \Delta \phi \quad (\text{figure 1}).$$

Les clichés sont réalisés au moyen d'un microscope électronique à balayage construit de telle façon que l'axe de Tilt T est le même pour les deux clichés. On détermine ensuite l'altitude des différents points de l'échantillon de la façon suivante :

Il faut définir un plan de référence (plan de cote zéro) ; plusieurs solutions sont possibles : on peut prendre le plan moyen de l'échantillon, ou bien encore l'un des deux plans d'image. On a choisi d'utiliser le plan de la première image.

On calcule ensuite le décalage d'un point de la première image vis-à-vis du point homologue dans la seconde image. On passe du décalage à l'altitude du point par une formule mathématique très simple. On peut considérer en effet que l'image est la projection centrale ou parallèle de l'objet. Si le grandissement est suffisamment élevé, on peut admettre que la projection est parallèle (figure 2).

L'altitude z d'un point est donnée par :

$$z = \frac{x_2 - x_1 \cos \Delta \phi}{\sin \Delta \phi}, \quad \text{avec } d = x_2 - x_1$$

x_1 et x_2 étant les coordonnées respectives des points homologues sur les deux images, et d le décalage.

2) Détection des points homologues

On dispose donc de deux images par échantillon. La détection des zones homologues des deux images consiste, un peu comme le fait un observateur, à repérer une zone dans la première image et à essayer de lui faire correspondre, dans la 2ème image la zone qui lui ressemble le plus. Désignons par $f(x)$, la luminance de la 1ère image au point x et par $g(x)$ celle de la seconde. Ces deux fonctions sont définies sur un domaine D (champ des deux clichés). Soit un masque S, implanté dans D. On peut chercher à minimiser l'écart des deux fonctions f et g à l'intérieur de ce champ f. Pour cela, après avoir implanté S sur la 1ère image, on peut rechercher l'implantation du masque sur la 2ème image, qui minimise l'intégrale :

$$\int_S [f(x) - g(x+h)]^2 dx = D(h) \quad (1)$$

S'il existe une valeur de h pour laquelle D(h) est minimum, cette valeur indiquera le décalage entre les deux zones des deux images. On peut noter que les décalages, dans le cas qui nous intéresse ne peuvent se produire que dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation de l'échantillon et que de plus, il ne peut pas y avoir de rotation des zones homologues l'une par rapport à

l'autre. (figure 3). Si on développe D(h), on trouve :

$$(2) \quad D(h) = \int_S f^2(x) dx + \int_S g^2(x+h) dx - 2 \int_S f(x)g(x+h) dx$$

le premier terme est constant, quelque soit la position du masque S sur la deuxième image. D'autre part, si on suppose que le second terme varie très peu pour toute implantation de S dans la deuxième image, minimiser D(h) revient donc à maximiser le terme :

$$(3) \quad C(h) = \int_S f(x)g(x+h) dx$$

qui n'est rien d'autre que la fonction de corrélation croisée de f(x) et g(x).

Malheureusement, l'hypothèse de l'invariance du terme $\int_S g^2 dx$ est trop sévère, et on prend en compte ses variations en normant la fonction de corrélation :

$$(4) \quad C_0(h) = \frac{C(h)}{\left[\int_S g^2 dx \right]}$$

Les premiers essais de calcul automatique de décalage par détection du maximum de la fonction de corrélation ont fourni des résultats très décevants, voire même aberrants. Pour tenter d'expliquer les raisons de cet échec, observons le couple de clichés de la figure 4.

L'oeil, à l'évidence, ne procède pas, pour rechercher les zones homologues, par corrélation des fonctions de luminance des deux clichés, mais s'intéresse plutôt aux zones très contrastées, car seules ces zones laissent apparaître des détails facilement repérables (tels que les zones de flamboiement d'arêtes, les arrachements, les rivières, etc...). Une zone uniforme, même très claire, c'est-à-dire correspondant à des valeurs de f et g élevées, ne présente absolument aucun intérêt. Donc, vouloir corréler ces zones, ou rien n'est discernable ne peut conduire qu'à des résultats aberrants, car la fonction de corrélation prendra en compte des variations lentes de luminance, ou des différences d'éclairement moyen que l'oeil évacue totalement.

Cette explication permet alors d'envisager une solution au problème de la corrélation, solution décomposable en deux termes : le premier terme est de prendre en compte non plus f et g, mais leurs dérivées premières, puisque à un contraste élevé, correspond une forte valeur du module du gradient des fonctions f et g :

$$(5) \quad |\text{grad } f| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Le deuxième terme fait intervenir la notion de seuil. En effet, plus le gradient en un point de l'image sera élevé, plus le point sera remarquable. Mais, inversement, vouloir prendre en compte des zones à faible gradient est illusoire, pour les mêmes raisons que celles indiquées plus haut. On peut alors procéder comme suit :

Soient les fonctions f et g , et x , un point du plan $\in D$. On définit alors pour chaque image une fonction $k_f(x)$ et $k_g(x)$, de la façon suivante :

$$\forall x \in D, \quad \begin{cases} k_f(x) = 1 & \text{si } |\text{grad } f(x)| \geq G_0 \\ k_f(x) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6)$$

même définition pour $k_g(x)$.

Cette définition introduit deux éléments nouveaux : l'utilisation d'un seuil critique de gradient G_0 et la transformation de fonctions analogiques f et g en fonctions en tout ou rien k_f et k_g , qui sont les fonctions indicatrices de l'ensemble des points présentant un contraste supérieur à la valeur G_0 choisie par l'utilisateur.

Cette procédure apporte une simplification considérable de l'information à traiter. En effet, la corrélation numérique des fonctions en tout ou rien peut s'exprimer très facilement en termes ensemblistes : En effet, désignons par X_1 et X_2 , l'ensemble des points à contraste supérieur à G_0 , respectivement sur les clichés 1 et 2 ; (k_f et k_g indicatrices de ces deux ensembles). En désignant par $s(x)$ l'indicatrice du masque S implanté au point x , on voit que k_f et k_g étant identiques dans S à une translation près, l'expression :

$$(7a) \quad \int_S k_f(x) k_g(x+h) dx$$

est maximum.

De la même façon :

$$(7b) \quad \int_S [1 - k_f(x)] k_g(x+h) dx$$

est minimum. On peut donc déterminer la valeur de h , si elle existe, pour laquelle :

$$(7) \quad \begin{aligned} I(h) &= \int_S k_f(x) k_g(x+h) dx - \int_S k_g(x+h) [1 - k_f(x)] dx \\ &= \int_{R^2} s(x) k_f(x) k_g(x+h) dx - \int_{R^2} s(x) k_g(x+h) [1 - k_f(x)] dx \end{aligned}$$

est maximum.

Le maximum de la fonction est égal à $\int_{R^2} k_f(x) s(x) dx$ si $k_g = k_f$ (à une translation h près).

On voit facilement que cette expression peut s'écrire :

$$I(h) + \int_S k_g - k_f k_g = \int_S k_f k_g$$

Le premier terme sera maximum et égal à :

$\int_S k_f + k_g - k_f k_g$, lorsque l'ajustement des fonctions f et g sera réalisé. En appelant J cette fonction, normée par sa valeur maximum, on obtient :

$$(8) \quad J(h) = \frac{\int_{R^2} s(x) k_f(x) k_g(x) k_g(x+h) dx}{\int_{R^2} s(x) (k_f(x) + k_g(x+h) - k_f(x) k_g(x+h)) dx}$$

qui sera maximum et égale à 1 pour l'ajustement parfait.

On peut écrire encore :

$$J(h) = \frac{\text{Aire}(X_1 \cap X_2^{-h} \cap S)}{\text{Aire}((X_1 \cup X_2^{-h}) \cup S)}$$

en appelant X_2^{-h} le translaté de $-h$ de X_2 .

On déterminera donc par la suite le maximum de ce quotient qui prend ses valeurs entre 0 (dissemblance totale) et 1 (similarité parfaite).

3) Algorithmes de gradients

La figure 5 donne le principe de la mise en évidence de gradients.

Soit $f(x)$ la fonction de luminance de l'image en tout point $x \in D$. Choisir un niveau de seuil S_i consiste à transformer l'image en une image en tout ou rien dont la fonction indicatrice k est donnée par :

$$(10) \quad \begin{cases} k_i(x) = 1 & \text{si } f(x) \leq S_i \\ k_i(x) = 0 & \text{sinon,} \quad \forall x \in D \end{cases}$$

Le gradient de la fonction f en chaque point n n'est autre qu'un vecteur dont la direction correspond à la plus grande pente en x et dont le module est égal à la tangente de l'angle de plus grande pente α . Considérons deux niveaux de seuil S_i et S_j séparés de ΔS . Les points de l'image appartenant à cette bande de seuil et dont le module du vecteur gradient est supérieur ou égal à G sont les points situés à la fois à une distance inférieure ou égale à $l = \Delta S/2G$ de S_i et du complémentaire de S_j .

Ces points appartiennent donc à la fois au dilaté de S_i par une boule lB de rayon l , et au dilaté de S_j^c .

$$x \in D \text{ tel que } |\text{grad } f(x)| \geq G$$

$$d(x, S_i) \leq l \text{ et } d(x, S_j^c) \leq l$$

$$(11) \quad x \in (S_i \oplus lB) \cap (S_j^c \oplus lB)$$

L'entraction de tous les points de l'image ayant un module de gradient supérieur à une valeur G donnée s'obtient par balayage de l'ensemble des niveaux de gris disponibles par la fenêtre ΔS ; Cet ensemble Y est donc :

$$(12) \quad Y = \bigcup_{i=0}^{i \max} [(S_i \oplus lB) \cap (S_{i+\Delta S}^c \oplus lB)]$$

Il est à noter que l'orientation du vecteur gradient n'est pas préoccupante puisque l'algorithme l'intègre dans la construction de l'image (figure 5a).

Algorithmes et Résultats

1) Détection des contrastes

L'algorithme utilisé suit la description donnée plus haut. Il est possible de raffiner les algorithmes. Nous ne donnerons pas les détails des améliorations possibles, mais seulement des exemples d'images binaires obtenues par ces procédés (figure 6). L'analyseur de texture échantillonne le signal suivant une trame hexagonale. En pratique la boule lB est approchée par un hexagone, et la taille l est le plus souvent égale à un pas-image.

2) Calage des images

Les deux images doivent être parfaitement calées verticalement (c'est-à-dire dans la direction de l'axe de Rotation de l'échantillon), car la seule direction de recherche des zones homologues autorisée est, pour des raisons évidentes de simplicité de programmation, la direction horizontale. Un décalage horizontal entre les axes de rotation des deux images n'est pas critique. Il introduit seulement une constante arbitraire dans l'altitude des points, mais ne modifie en rien les altitudes relatives. Le calage procède également par corrélation, de la façon suivante :

Supposons les deux images décalées verticalement de la distance u (figure 7). Soit M un point de la première image d'ordonnée y , dont le gradient est supérieur à la valeur seuil G choisie pour la détection. Sur l'image des gradients M apparaît comme un point blanc. Mais comme l'axe des ordonnées est parallèle à l'axe de rotation, le point M sera décalé sur la deuxième image d'une distance dépendant de son altitude mais dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation. Ce point M doit donc apparaître en M' sur la droite d'ordonnée $y+u$. Et, il en est de même pour tous les points images de gradient supérieur à G . Dès lors, les quantités de points sur la ligne y de l'image 1 et sur la ligne $y+u$ de l'image 2 doivent être sensiblement égales. Définissons une fonction $q(y)$ pour les deux images :

$$q(y) = \text{Aire}(Y \cap L(y))$$

Y étant l'image des gradients, $L(y)$ la ligne d'ordonnée y , perpendiculaire à l'axe de rotation.

$$\text{On doit donc avoir : } q_1(y) = q_2(y+u)$$

donc :

$$R(h) = \int q_1(y) q_2(y+h) dy / \text{mes}(D_1 \cap D_2^{-h})$$

maximum pour $h = u$.

$R(h)$ est la fonction de corrélation croisée de q_1 et q_2 normée par la longueur de l'intersection de leurs supports D_1 et D_2^{-h} respectifs.

La figure 8 donne un exemple obtenu sur une image réelle, la fonction de corrélation calculée. La valeur pour laquelle la fonction de corrélation est maximale correspond au décalage des deux images.

Notons que les rotations des deux images l'une par rapport à l'autre ne sont pas corrigées. Il faut donc veiller à les éviter autant que faire se peut.

3) Calcul des points cotés

Le masque S est implanté selon une maille régulière sur la première image. Plusieurs filtrages sont effectués de façon à éliminer les erreurs de détection de point homologues. Il était possible d'utiliser une méthode d'approximations successives en implantant une suite de masques de plus en plus petits. Mais, pour des raisons de gain de temps, on a préféré utiliser d'emblée le plus petit masque, et d'augmenter sa taille dans le cas où il y a ambiguïté dans la détection des zones homologues. Cette démarche revient à prendre en compte toute zone pouvant être homologue à la zone étudiée, et ensuite à faire le choix de la bonne zone en comparant leurs environnements respectifs.

L'ordinogramme succinct du programme est donné à la figure 9. On cherche surtout à détecter les zones étroites de l'image des gradients correspondant aux lignes de crêtes et aux défauts. Les maxima de la fonction $J(h)$ supérieure à un certain seuil, sont seuls pris en compte. Si le maximum est unique la valeur de h correspondante donne le décalage. S'il existe plusieurs maxima, la taille du masque est augmentée par dilatation, et les valeurs de la fonction $J(h)$ recalculées pour les implantations litigieuses. Le maximum trouvé donne finalement la valeur du décalage qui sera retenue. On trouvera en annexe, un exemple de carte topographique obtenue. On peut remarquer que le plan de référence choisi fait que la topographie de l'échantillon est basculée d'un axe ϕ_0 . Le premier champ correspond à ce qui est à gauche de l'axe de tilt.

4) Améliorations possibles

On peut utiliser plusieurs images de gradients pour augmenter la densité de points calculés. Si deux valeurs de décalage différentes correspondent à la même zone, on choisit alors celle qui a été calculée sur l'image à plus fort gradient. Le bruit de fond de l'image devient beaucoup plus fort pour les gradients faibles.

Conclusions

Nous n'avons pas présenté la seconde partie de l'étude. En effet, la carte des points cotés doit permettre de calculer l'orientation moyenne des plans de fractures. Pour cela, il faut pouvoir attribuer à chaque facette l'ensemble des points cotés qui lui correspondent. Ce problème de segmentation de l'image peut être résolu par détection des arêtes de facettes. Cela introduit un procédé nouveau de calcul des décalages. En effet, on peut détecter d'abord les arêtes de facettes, puis ensuite effectuer un suivi de contour sur les arêtes homologues des deux images pour déterminer le décalage.

Ces procédés, bien que dérivant logiquement de ceux décrits plus haut conduisent à une révision complète de la façon d'envisager les problèmes posés. Nous n'en parlerons donc pas.

BIBLIOGRAPHIE

- 1/ J. SERRA : Introduction à la Morphologie Mathématique
C.M.M., Ecole des Mines de Paris, 1969
- 2/ J. SERRA : Analyse des fonctions à peu près en tout ou rien.
Rapport interne.
- 3/ H. DIGABEL, J. SERRA : La covariance continue.
Fascicules de Morphologie Mathématique Appliquée. C.M.M.
- 4/ P.G.T. HOWELL, A. BOYDE : Comparison of various methods for reducing measurements from stereo-pair scanning electron micrographs to "Relax 3-D data". University College, London.
- 5/ C. BEUCHER, F. MEYER : Méthodes d'analyse de contrastes à l'analyseur de textures. Proceedings - Congrès AFCEC-IRIA, Reconnaissance des formes et traitement des images. Février 1978.
- 6/ H. DIGABEL, C. LANTUEJOL : Iterative Algorithms.
Analyse quantitative des micro structures en sciences des matériaux, biologie et médecine. Dr. Riederer-Verlag, Stuttgart (1978).

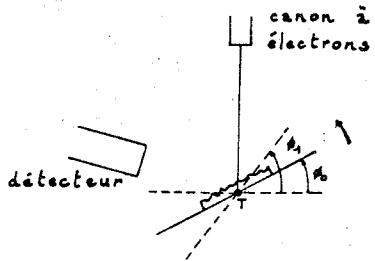


Figure 1

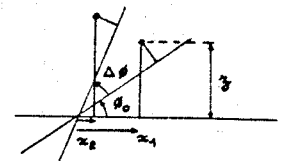


Figure 2

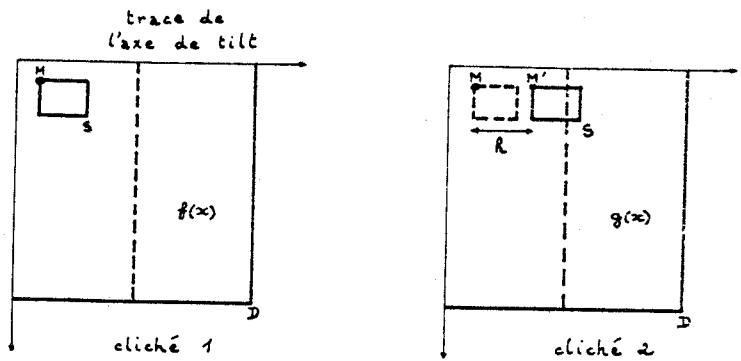


Figure 3



Figure 4 : Images stéréoscopiques d'une fracture.

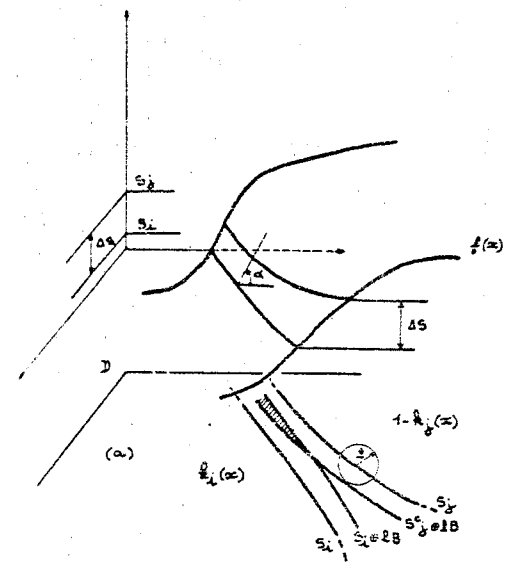
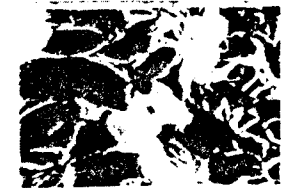
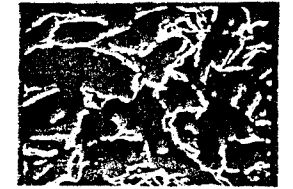


Figure 5 : extraction des contrastes.



(a)



(b)

Figure 6 : Image initiale (a) et ensemble des points à fort gradients (b).

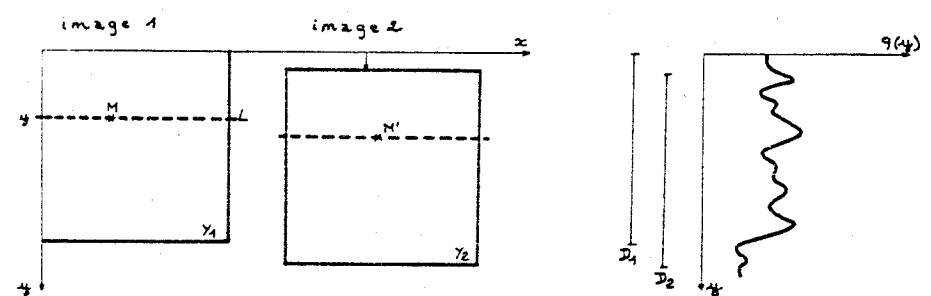


Figure 7 : principe du calage de deux images.

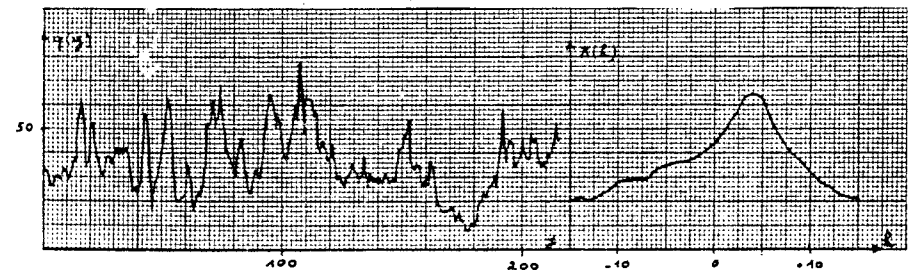


Figure 8

TABLEAU D'ECHANTILLONNAGE - 513
(NIVEAU NO 1)

	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	
8 4 1															-56					
12 9 1	-216	-211		-191	-166										-71	-36				
17 2 1				-181	-166					-101					-36					
21 6 1					-156	-151	-156	-91	-96	-111						9				14
25 9 1					-96	-151	-156	-91			-66	89			-6	-1				
30 3 1	-196				-166	-151					56					-16				
34 6 1	-196					-136											-11			-11
38 9 1	-186	-161			-166	-151	-136	-131								9	4			
43 3 1								-131	-126								-26	49	4	
47 6 1									-116	-121							-36	-71	-116	
51 9 1										-121							-16			
56 2 1											-116									
60 6 1										-131	-116	-161								
64 9 1						-151					-116	-111	-96	-101						
69 2 1					-171									-106						-11
73 6 1														-116						
77 9 1										-131										
82 3 1											24									
86 6 1																				
90 9 1	-186									-131					-91	-56				
95 2 1	-196										-116	-71	-96	-91	-56					
99 5 1												-116								
103 9 1	-186							-141		-101	-136				-66					
108 2 1		-186													-66					
112 5 1									-136							-61				
116 9 1			-176				-156													
121 2 1			-186																	
125 5 1								-151			-126				-76	-61	-66			
129 9 1									-146						-76	-61				
134 2 1									-146											
138 5 1													-116		-86					-6
142 9 1		-171					-196	-151						-121	-96					-16
147 2 1		-201		-221			-186							-96	-86					
151 5 1										-121				-91						
155 9 1	-206	-201							-146	-121										
160 2 1	-206	-201		-221						-121	-116						-16	-11		
164 5 1																	-16			
168 9 1	-216										-56						-16	-1		
173 2 1										-71	-56						-31			
177 5 1											-66	9	-76							
181 9 1		-216							-126	-96										
186 2 1									-126	-111							-36			
190 5 1	-126	-181			-186				-126	-96			-86	-51	-56					
194 9 1		-231				-176	-131			19		-91	-76	-51						

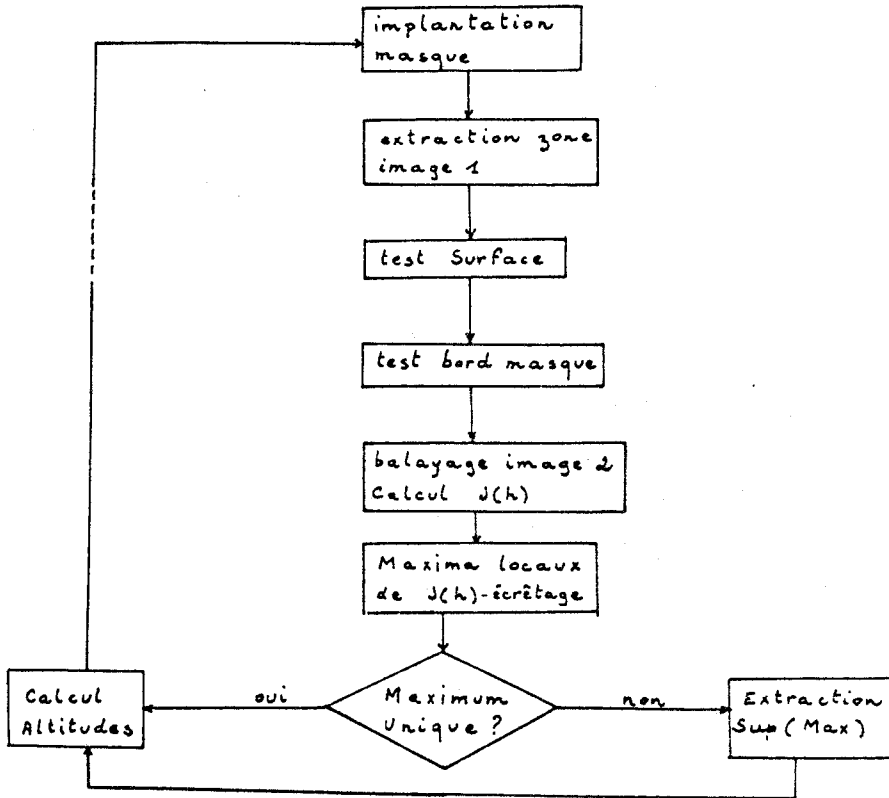


Figure 9 : Ordinoigramme simplifié du programme.

FRACTURES - CARTE TOPOGRAPHIQUE

ECHANTILLON : INADES 7442 (-) ET 7441 (+)

MARQUE D'ECHANTILLONNAGE : SXS
CHAMP NO 2

	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	
8.6 I																				
12.9 I																				
17.3 I															80	85	100			
21.6 I			15												70		120			
25.9 I														65	70	115				
30.3 I				40							60				70					
34.6 I	0		25	30		35													155	
38.9 I		5											85				115			
43.3 I											35					110	125			150
47.6 I																		130	135	
51.9 I																				
56.2 I													105	100			140	145	140	
60.6 I											40		105	110		35	130			
64.9 I											80									
69.2 I											80	95								
73.6 I		15		25							90	95	110		210					145
77.9 I											90		110	115	110		65	20		
82.2 I											90									
86.6 I		35	50																	
90.9 I				35																
95.2 I								75	80		85			110	115					
99.5 I								70	75		80	85		110						
103.9 I																				
108.2 I									70											140
112.5 I		15	30		50			65											125	140
116.9 I				25	40												105			125
121.2 I	10						50	55							100			120		
125.5 I	10								70					105						125
129.9 I																				
134.2 I																				
138.5 I																				
142.8 I	-10																			
147.2 I	-10																			
151.5 I		-4	10																	
155.8 I																				
160.2 I			15	20	25															
164.5 I					25															110
168.8 I				35	40			45		85								100	105	
173.2 I						45	40		70	85			80	95	180	95	100			
177.5 I					30	45	60									105	110			
181.8 I			15	40	55															
186.1 I		15																		180
190.5 I	10														80			155		
194.8 I						45	50		-26									150		