

- Beucher -

CENTRE DE MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE
ECOLE DES MINES DE PARIS
35, rue Saint-Honoré
77305 FONTAINEBLEAU

et

INSTITUT DE RECHERCHES DE LA SIDERURGIE FRANCAISE
185, rue Président Roosevelt
78105 SAINT GERMAIN EN LAYE CEDEX

S. BEUCHER

T. HERSANT

ANALYSE QUANTITATIVE DE SURFACES NON PLANES

APPLICATION A LA DESCRIPTION DE FACIES DE RUPTURE FRAGILE PAR CLIVAGE

Compte rendu de fin d'étude d'une
recherche financée par la Délégation
Générale à la Recherche Scientifique
et Technique.

Action concertée Métallurgie
Commission Fragilité-Rupture

Août 1979.

Décision d'aide n° 76.7.1209
1210

PA3 2153 - TH/CC

Cte n° 95 57 00 56

ANALYSE QUANTITATIVE DE SURFACES NON PLANES
APPLICATION A LA DESCRIPTION DE FACIES DE RUPTURE FRAGILE PAR CLIVAGE

S. BEUCHER et T. HERSANT

Résumé.

On décrit des méthodes permettant l'analyse de clichés stéréoscopiques de faciès de rupture fragile par clivage. On précise dans un premier temps les conditions opératoires pour la réalisation de ces clichés, notamment contraste et bruit électronique. Puis on explicite un certain nombre d'algorithmes qui sont des itérations de transformations d'images (au sens de la morphologie mathématique) permettant soit d'obtenir une carte cotée de la surface de rupture, soit de reconstituer les facettes de clivage à partir des minima locaux de contraste (gradient de l'intensité lumineuse) dans chaque image de la paire stéréoscopique. Les difficultés liées à l'exploitation de ces méthodes sur l'analyseur de textures T.A.S. sont discutées. On utilisera ces algorithmes pour étudier les relations entre la morphologie des clivages (taille, désorientation, ...) et la résistance d'un acier extra doux ayant subi différents traitements.

*

*

*

TABLE DES MATIERES

1 - INTRODUCTION	p. 3
2 - CONDUITE DE L'ETUDE	4
2.1 - Matériaux et traitements	4
2.2 - Mesures effectuées	5
2.2.1 - Aspect métallurgique	5
2.2.2 - Aspect traitements d'images	7
2.3 - Méthode d'analyse	8
2.3.1 - Réalisation des clichés stéréoscopiques. Conditions opératoires	8
2.3.2 - Analyse des clichés stéréoscopiques	8
2.3.2.1 - Principe de la méthode	8
2.3.2.2 - Algorithmes	11
2.3.2.2.1 - Transformation des formules de covariance croisée	11
2.3.2.2.2 - Opérateur gradient	12
2.3.2.2.3 - Calage des images	13
2.3.2.2.4 - Points homologues	15
2.3.2.2.5 - Sortie des résultats	17
2.3.3 - Fermeture des contours des facettes de clivage	17
2.3.3.1 - Limites de l'algorithme précédent	17
2.3.3.2 - Améliorations	17
2.3.3.3 - Nouvelle méthode - détection des contours	19
2.3.3.3.1 - Détection des minima de gradient	19
2.3.3.3.2 - Reconstitution des bassins versants	21
3 - DISCUSSION	23
4 - CONCLUSIONS	25
BIBLIOGRAPHIE	26
Annexe I - Formules stéréoscopiques	35
Annexe II - Présentation de la morphologie mathématique et de l'analyseur de textures	38
Annexe III - Listages des algorithmes	43

1 - INTRODUCTION.

Si la métallographie quantitative s'est considérablement développée tant sur le plan des méthodes que sur celui de l'instrumentation, ces développements concernent essentiellement deux types de prélèvements : sections d'un matériau opaque (sections polies par exemple) ou projections d'un matériau transparent (lames minces, répliques), prélèvements entre lesquels on distingue parfois en fonction de l'échelle des phénomènes observés un mode intermédiaire : les sections épaisses (zone correspondant à la profondeur de champ du microscope pour une préparation biologique par exemple). Il s'agit là, en fait, de prélèvements plans (plans de section ou de projection) et les caractéristiques planes que l'on peut en extraire sont reliées ensuite à des caractéristiques tri-dimensionnelles des structures au moyen de relations stéréologiques.

Un domaine encore largement inexploité quantitativement est celui des surfaces non planes et notamment les surfaces de ruptures. Pour analyser ce type de surfaces il est nécessaire de connaître le relief. Ce relief pourrait par exemple être obtenu en balayant la surface à l'aide d'un rugosimètre, ce qui permettrait d'établir directement une carte cotée de la surface. Ce n'est en général pas possible et il est alors nécessaire d'avoir recours aux méthodes stéréoscopiques, c'est-à-dire de disposer de deux clichés de la surface légèrement désorientés l'un par rapport à l'autre (quelques degrés). Ces méthodes sont bien connues et la littérature en traite en détail qu'il s'agisse de clichés réalisés en microscopie optique, en microscopie électronique à balayage ou en transmission. Cependant, pour réaliser une carte cotée à partir de clichés stéréoscopiques, les mesures à faire sur ces clichés sont particulièrement lourdes et d'une durée prohibitive car effectuées manuellement, quand bien même on utilise un appareil du type stéréocomparateur.

Une telle exploitation est exceptionnelle.

Le but de cette recherche est donc essentiellement méthodologique : étudier les moyens et les méthodes permettant d'obtenir une description quantitative automatique de surfaces de rupture. Pour cela, il faut être capable de prendre en compte simultanément les deux clichés stéréoscopiques de manière à mettre en oeuvre des algorithmes automatiques de traitement des images pour réaliser d'une part une carte cotée de la surface de rupture et d'autre part pour mettre en évidence les constituants intéressants de cette surface. Un tel équipement a été mis au point par le Centre de Morphologie Mathématique et est brièvement décrit plus loin.

Il n'y a pas à notre connaissance d'antériorité en ce qui concerne ces méthodes. Nous n'avons trouvé qu'une bibliographie réduite portant notamment sur certains aspects stéréologiques pour des surfaces non planes.

Quelques articles très récents montrent cependant l'intérêt croissant apporté à l'utilisation de telles méthodes.

Comme support à cette étude, nous avons choisi de nous intéresser aux faciès de rupture fragile par clivage dans un acier extra doux. Il semble bien admis que deux paramètres sont déterminants du point de vue propriétés de résistance au choc du métal : taille des facettes de clivage et désorientation de ces facettes. Dans le domaine de la rupture fragile, la résistance au choc du métal est d'autant plus faible que les facettes sont grosses ou/et, localement, peu désorientées.

On cherche donc à mesurer ces caractéristiques (ce qui ne semble pas avoir été fait de manière précise au vu de la littérature) de manière à apprécier l'importance de ces différents paramètres en relation avec la taille des grains et les propriétés mécaniques.

2 - CONDUITE DE L'ETUDE.

2.1 - Matériaux et traitements.

Nous avons choisi un acier extra doux calmé à l'aluminium industriel de composition :

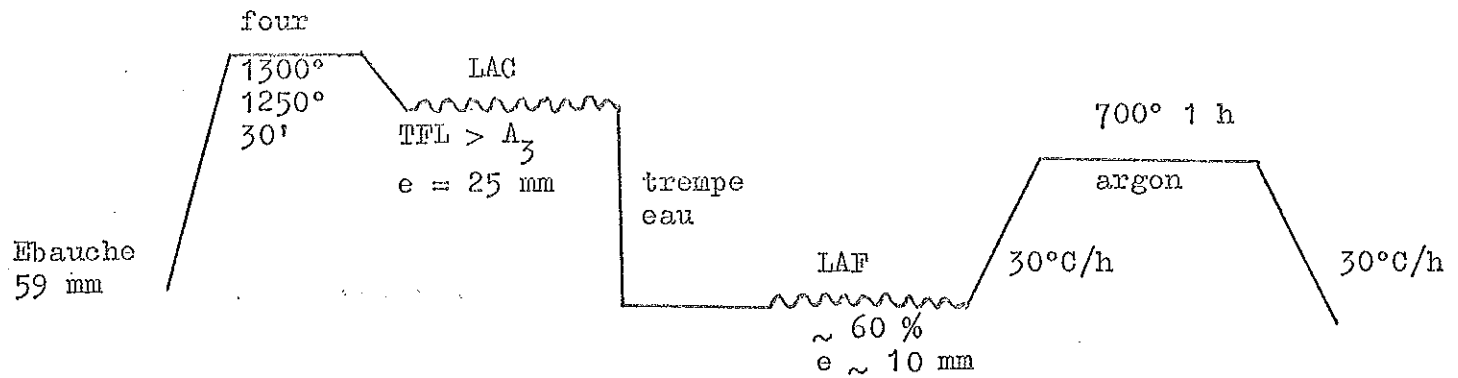
C : 0,046 - Mn : 0,245 - Si : 0,016 - S : 0,013 - Al : 0,049 - N : 0,005 (%).

Deux sortes de traitements ont été effectués :

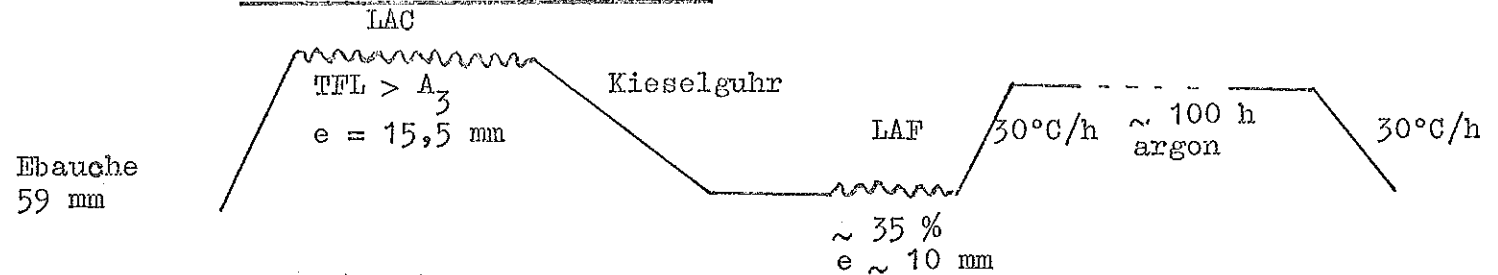
- des traitements d'austénitisation à 1000°C, 1100°C et 1200°C pendant 30' suivis d'un refroidissement Kieselgühr de manière à obtenir trois tailles de grains nettement différentes.

- des traitements de laminage à chaud, à froid suivis d'un recuit de manière à obtenir des textures suffisamment marquées avec deux tailles de grains suivant les schémas suivants :

1° - forte texture - grains fins :



2° - forte texture - gros grains :



Dans le premier cas, le réchauffage à haute température et la trempe après laminage à chaud sont destinés à mettre AlN en solution et à conserver ces éléments en solution solide; la texture est obtenue par laminage à froid (60 %) et le grain fin par contrôle de la recristallisation et blocage de la croissance par le nitrure d'aluminium précipitant au cours du recuit.

Dans le deuxième cas, on cherche au contraire à faire précipiter AlN avant le laminage à froid (35 %) et la texture est ici obtenue par croissance des grains.

Ces traitements doivent permettre d'apprécier les influences relatives de la taille des grains et des facettes de clivage et de leur désorientation sur les propriétés de résistance au choc.

2.2 - Mesures effectuées.

2.2.1 - Aspect métallurgique.

Pour les cinq traitements, nous avons mesuré les courbes de transition de résilience Charpy V représentées sur les figures 1 et 2. Les valeurs des niveaux ductiles et les températures de transition sont données dans le

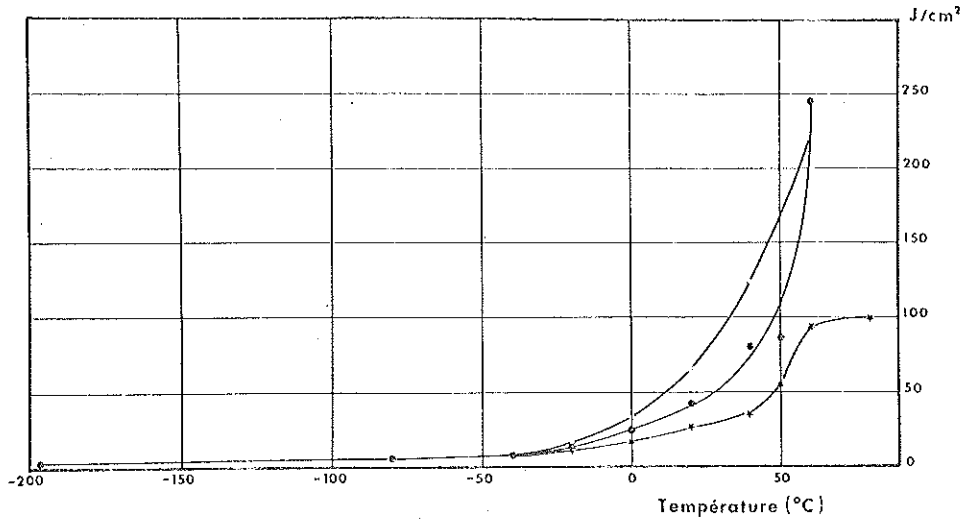


Fig. 1 - Courbes de transition de résilience Charpy V.
 ○ austénitisé 1000°C
 ● austénitisé 1100°C
 ☆ austénitisé 1200°C.

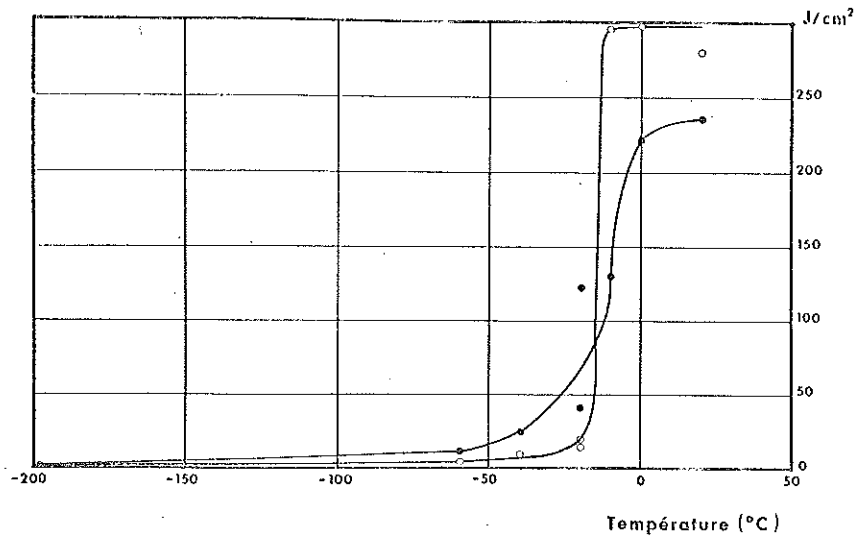


Fig. 2 - Courbes de transition de résilience Charpy V.
 ○ laminé à froid 60 % recuit 700°C/1 h
 ● laminé à froid 35 % recuit 700°C/100 h.

tableau I.

De plus, à titre de référence pour l'examen des faciès de rupture fragile, une éprouvette a été rompue au palier fragile (- 196°C).

Les tailles de grains ont été mesurées sur les éprouvettes de résilience. Les micrographies obtenues sont données dans les planches I à V. Les tailles de grains ont été mesurées à 45° par rapport à la direction de laminage dans un plan DN-DL sauf pour l'échantillon laminé à 60 % où l'on donne les valeurs dans les directions normale (DN) et long (DL) (cf. tableau I où l'on donne également les teneurs en perlite).

D'autre part, pour les deux échantillons laminés à froid, nous avons mesuré les figures de pôles {200} dans un plan DL-DT représentés sur les planches IV et V. Pour préciser davantage, nous avons mesuré les intensités diffractées par les plans {100} (plans de clivage) parallèles au plan DN-DT, plan correspondant au plan moyen de rupture des éprouvettes de résilience comme le montre la figure 3. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau II rapportées à l'intensité correspondante pour un échantillon sans texture.

2.2.2 - Aspect traitement d'images.

Pour l'analyse des surfaces de rupture, nous avons choisi, pour les cinq traitements, des éprouvettes rompues dans le domaine fragile, c'est-à-dire à des températures de - 196°C, - 80°C ou - 20°C. Pour chacune de ces éprouvettes, nous avons réalisé des séries de dix paires de clichés stéréoscopiques des faciès de rupture en microscopie à balayage selon la méthode décrite plus loin. Des montages stéréoscopiques sont présentés sur les planches I à V.

A titre de test pour la méthode d'analyse d'images, nous avons réalisé, dans les mêmes conditions que pour les faciès de rupture, une paire stéréoscopique d'une empreinte de dureté Vickers (planche VI). Des mesures manuelles (à l'aide d'un stéréocomparateur Hilger et Watt) d'angles entre facettes de l'empreinte de dureté ont été réalisées par quatre opérateurs et sont comparés aux angles correspondants du diamant utilisé pour l'indentation (tableau III), ainsi qu'aux valeurs obtenues à l'aide de l'analyseur de texture.

2.3 - Méthode d'analyse.

2.3.1 - Réalisation des clichés stéréoscopiques - conditions opératoires.

Nous avons utilisé un microscope électronique à balayage CAMECA MEB 07 préféré à un microscope en transmission en raison des grossissements utilisés (inférieurs à 350 fois) et de la plus grande facilité d'emploi (on travaille directement sur les éprouvettes de résilience). Cet appareil est par ailleurs équipé d'une platine goniométrique du type rotation-tilt, ce qui permet notamment de placer l'axe de tilt dans le plan moyen de la fracture et de réaliser les rotations sans perdre la plage observée (cet axe de rotation est, sur les micrographies, "vertical" et situé au centre de la plage).

On s'est placé dans des conditions permettant la plus grande profondeur de champ possible aux grossissements utilisés, grossissements étalonnés à l'aide d'un réseau calibré.

Les clichés stéréoscopiques sont réalisés avec une différence d'angle de rotation de 6° (la normale au plan moyen de rupture faisant des angles de 25° et 31° avec le faisceau électronique incident).

Les clichés sont des diapositifs directs obtenus par inversion du contraste de l'image électronique (inversion de la polarité du wehnelt de l'oscilloscope), développés dans un révélateur papier pour obtenir un contraste élevé. Les documents sont alors directement utilisables en diascope pour l'analyse.

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide car on supprime les opérations fastidieuses de tirage sur papier ce qui, de plus, minimise la perte d'information correspondante.

Enfin, en relation avec les algorithmes utilisés pour l'analyse d'image, nous avons cherché à amplifier le contraste en modifiant le circuit électronique d'amplification du signal vidéo du MEB 07. A l'origine les réglages des composantes continue et alternative du contraste étaient interdépendants. Ils ont été isolés en insérant entre les deux circuits un amplificateur opérationnel en montage différentiel avec un gain égal à l'unité. Un exemple des résultats obtenus est montré sur la planche VI.

2.3.2 - Analyse des clichés stéréoscopiques.

2.3.2.1 - Principe de la méthode.

On cherche à reconstituer le relief à partir d'une paire de

clichés stéréoscopiques en repérant sur chacun des clichés les points homologues de manière à pouvoir en calculer la cote par mesure de la parallaxe (cf. Annexe I).

Pour identifier et extraire les points homologues (qui sont des points caractéristiques de la surface de rupture - limites de facettes, languettes, rivières, etc.) on procède de la manière suivante :

On repère une petite zone dans la première image et on essaye 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 petit masque S , implanté dans D . On peut chercher à minimiser l'écart des deux fonctions f et g à l'intérieur de ce masque S . Pour cela, après avoir implanté S sur la 1ère image, on peut rechercher l'implantation de ce 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 (cf. Annexe I) et que de plus, il ne peut pas y avoir de rotation des zones homologues l'une par rapport à l'autre. Si on développe $D(h)$, on trouve :

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

Le premier terme est constant, quel que 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 :

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

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 :

$$c_o(h) = \frac{c(h)}{[\int_S g^2 dx]} \quad (4)$$

Le mode de détermination de décalage par détermination du maximum de la fonction de corrélation étant précisé, revenons sur le choix des fonctions f et g.

Nous avons constaté que le calcul de décalage fournissait des résultats décevants voire aberrants en prenant pour f et g les luminances des clichés.

Pour tenter d'expliquer les raisons de cet échec, observons le couple de clichés de la planche I.

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, où 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, variations introduites en particulier par la variation d'éclairement d'un cliché à l'autre due à leurs angles de tilt différents.

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 :

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

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 appartenant à 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 $k_g(x)$.

Dans la relation (2) nous allons donc remplacer f et g par les fonctions k_f et k_g définies par (6) et qui sont les fonctions indicatrices de l'ensemble des points présentant un contraste supérieur à la valeur G_0 choisie par l'utilisateur.

2.3.2.2 - Description des algorithmes.

2.3.2.2.1 - Transformation des formules de covariance croisée.

L'expression de $D(h)$ devient :

$$D(h) = \int_S k_f^2(x) dx + \int_S k_g^2(x+h) dx - 2 \int_S k_f(x) k_g(x+h) dx$$

Toutes transformations faites, minimiser $D(h)$ revient à maximiser :

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

où $s(x)$ est la fonction indicatrice du masque S :

$$s(x) = 1 \text{ si } x \in S$$

$$s(x) = 0 \text{ sinon.}$$

Si pour un décalage h donné, $k_f(x) = k_g(x+h)$ alors $I(h)$ est maximum et égale à :

$$I(h) = \int_{R^2} s(x) k_f(x) dx$$

On voit facilement que l'expression (7) 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 :

$$\int_S k_f + k_g - k_f k_g, \text{ lorsque l'ajustement des fonctions } k_f \text{ et } k_g$$

sera réalisé. En appelant J cette fonction, normée par sa valeur maximum, on obtient :

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

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

On peut écrire encore :

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

si X_1 et X_2 sont les ensembles des points de module de gradient supérieur à G_0 des clichés 1 et 2.

X_2^{-h} désigne 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).

2.3.2.2.2 - Description de l'opérateur gradient.

La figure 3 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 :

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

Le gradient de la fonction f en chaque point x n'est autre qu'un vecteur dont la direction correspond à la plus grande pente au point 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 S_j^c de S_j .

Ces points appartiennent donc à la fois au dilaté de S_i par une boule $1B$ de rayon l , et au dilaté de S_j^c .

$$\begin{aligned} x \in D \text{ tel que } |\vec{\text{grad}} f(x)| &\geq G \\ &\iff \\ d(x, S_i) \leq l \text{ et } d(x, S_j^c) &\leq l \\ &\iff \\ x \in (S_i \oplus 1B) \cap (S_j^c \oplus 1B) & \end{aligned} \quad (11)$$

L'extraction 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 :

$$Y = \bigcup_{i=0}^{i \text{ max}} [(S_i \otimes 1 B) \cap (S_i^c + \Delta S \otimes 1 B)] \quad (12)$$

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 3).

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 4). L'analyseur de texture échantillonne le signal suivant une trame hexagonale. En pratique la boule $1B$ est approchée par un hexagone, et la taille l est le plus souvent égale à un pas-image.

2.3.2.2.3 - 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 5). 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 :

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

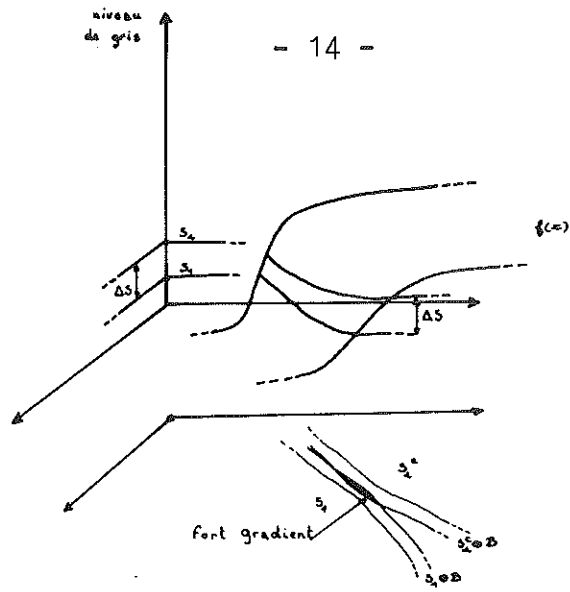


Fig. 3 - Extraction des contrastes.

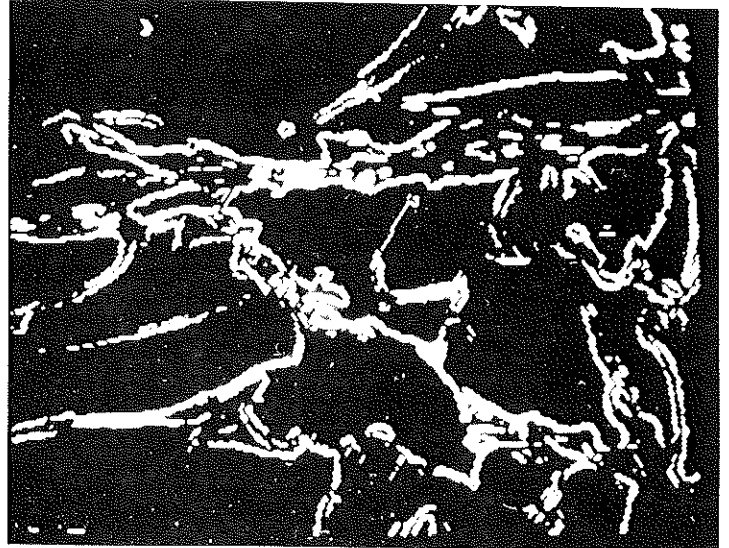
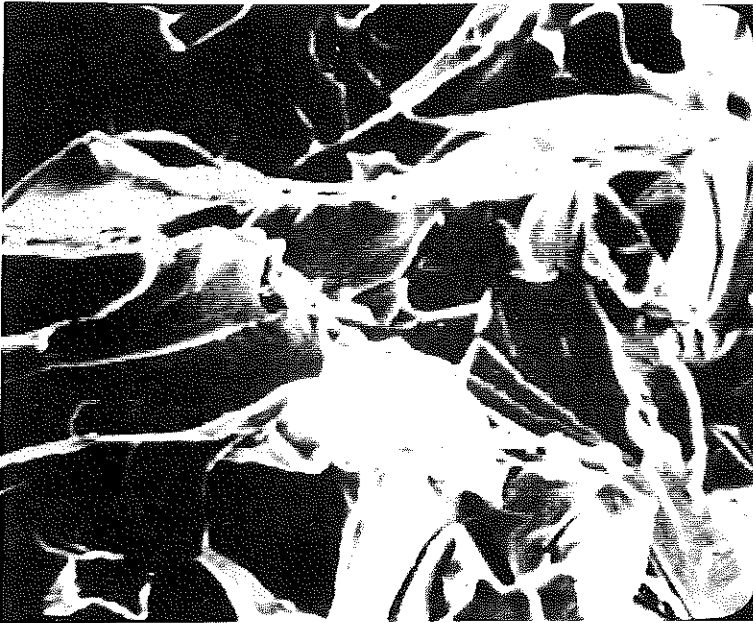


Fig. 4 - Exemple d'extraction des contrastes.

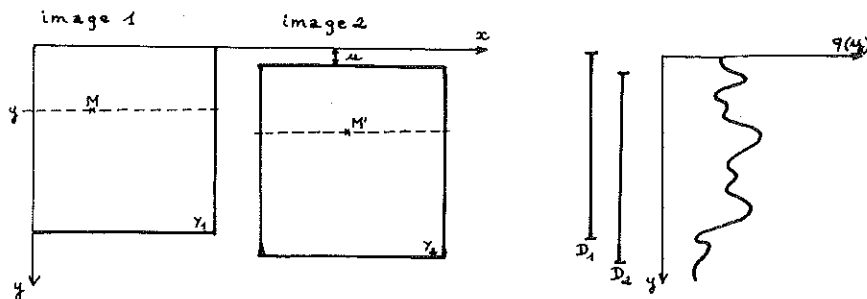


Fig. 5 - Calage des images.

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

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 6 donne pour une surface de rupture 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.

2.3.2.2.4 - Calcul des cotes des points homologues.

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 points 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.

La figure 7 représente les principaux filtrages effectués.

Les maxima de la fonction J (h) ne sont pris en compte que s'ils sont suffisamment élevés : le seuil choisi est de 0,50. Tout maximum inférieur à cette valeur n'est pas pris en compte (fig. 7 a). De la même façon, les maxima en forme de plateau ne sont pas conservés (ces maxima apparaissent lorsque l'orientation du contour est parallèle à la direction de balayage (figure 7 b)). Seuls les maxima de type (c) et (d) permettent le calcul des altitudes. Pour ces différents filtrages, le taux de points aberrants est inférieur à 10 %.

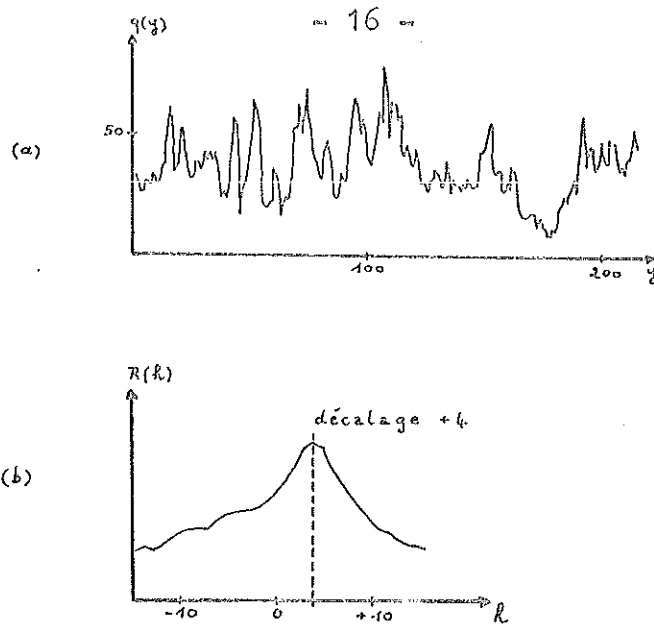


Fig. 6 - Fonction de corrélation pour une surface de rupture.

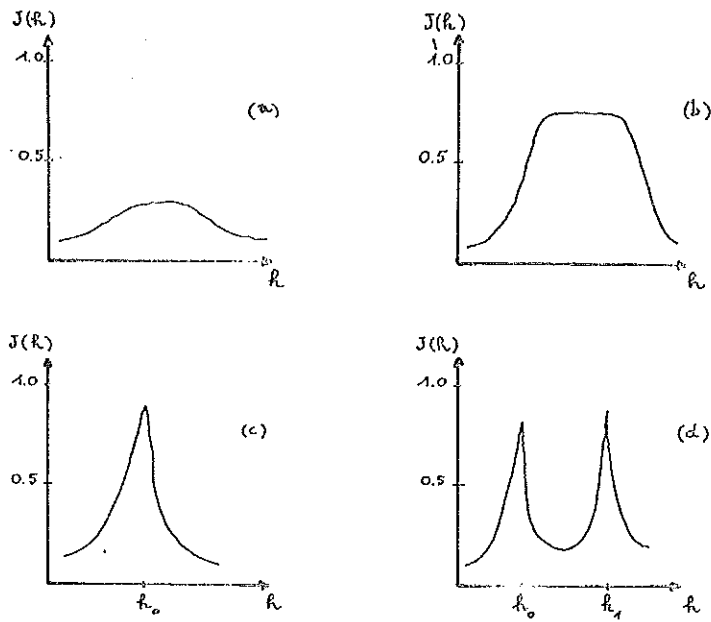


Fig. 7 - Filtrages effectués.

2.3.2.2.5 - Sortie des résultats.

Le relief est restitué sous forme d'une carte de points cotés. On en montre un exemplaire ainsi que les clichés stéréoscopiques correspondants (figure 8). La densité des points cotés n'est pas très élevée et très inhomogène. Les zones prises en compte correspondent en effet aux forts gradients et donc les facettes présentant un niveau de gris constant ne permettent pas le calcul de l'altitude. L'inconvénient majeur de cette carte est que les contours de facettes ne sont pas fermés. Il est donc impossible à ce stade de calculer tous les paramètres morphologiques intéressants tels que surface, périmètre et longueur des joints, etc. Pour la même raison, on ne peut calculer de façon automatique l'inclinaison des facettes de fracture, car il est impossible d'affecter un quelconque point coté à une facette plutôt qu'à une autre. A ce stade, la délimitation des facettes et l'affectation des points cotés doit être effectuée par l'opérateur.

La méthode est assez longue et fastidieuse et ne permet pas d'envisager le traitement d'un grand nombre d'échantillons.

2.3.3 - Fermeture des contours.

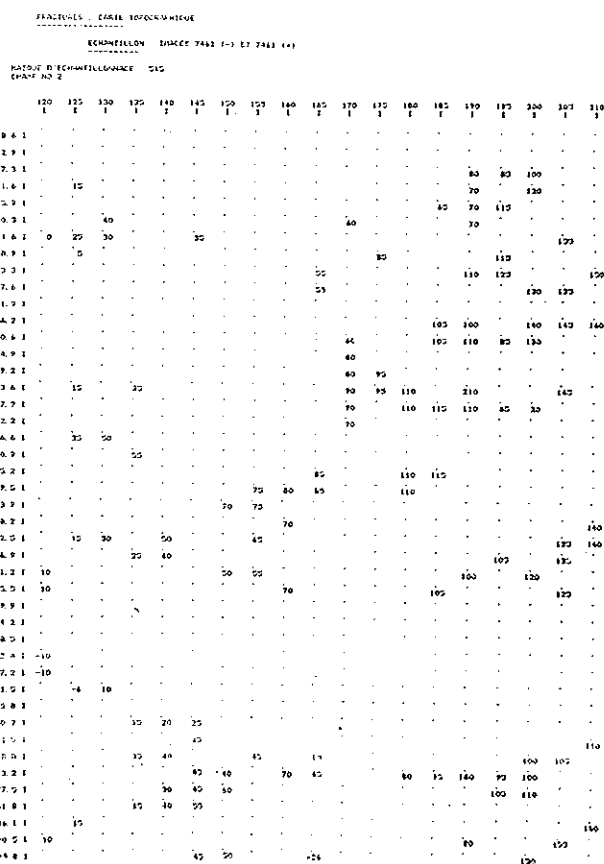
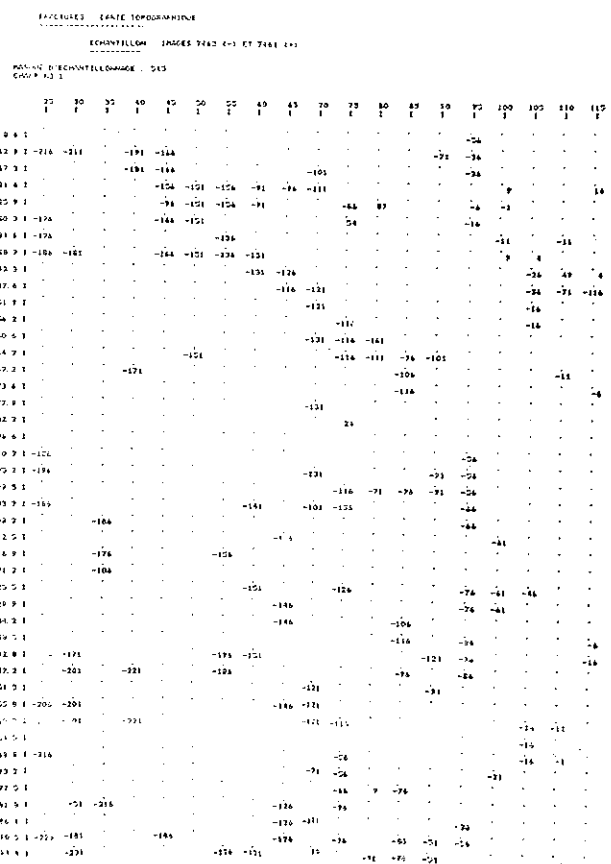
2.3.3.1 - Limites de l'algorithme précédent.

L'algorithme, tel qu'il vient d'être présenté, aboutit un peu à une impasse. On dispose d'une carte topographique, à partir de laquelle on peut envisager un traitement cartographique numérique. Cependant la densité de points cotés obtenus est assez faible et l'interpolation de valeurs d'altitudes dans les "trous" est assez hasardeuse sans connaissance précise de la structure du relief. On pourrait envisager le recours à des méthodes géostatistiques (Krigage), mais le développement de telles méthodes demande des outils de calcul assez puissants, et dépasse le cadre de cette étude.

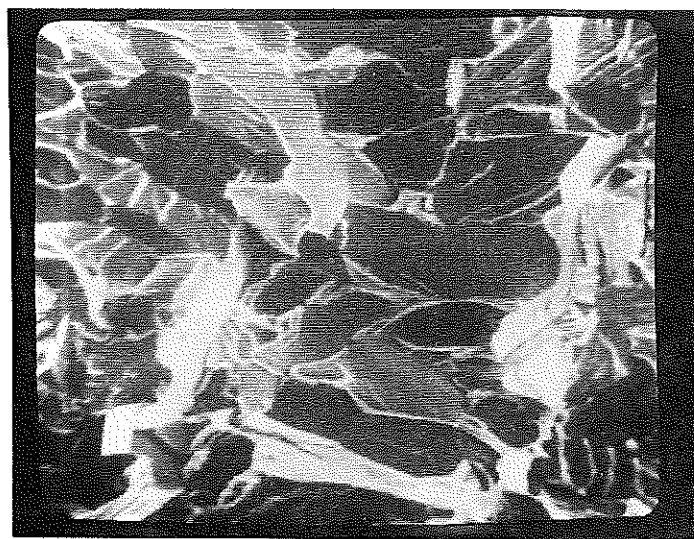
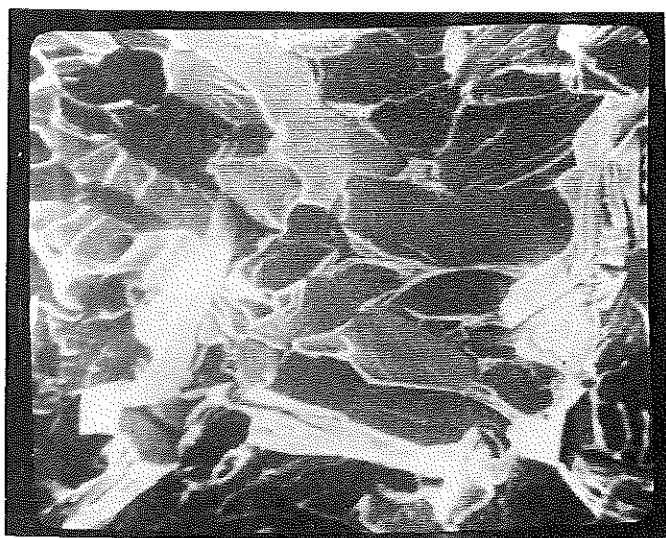
2.3.3.2 - Améliorations.

On peut avoir recours à des gradients de plus en plus faibles, ceci afin d'augmenter la densité de points cotés. Si on obtient, pour une même zone, plusieurs valeurs d'altitude, correspondant à l'utilisation de plusieurs niveaux de gradients, on ne conserve que l'altitude correspondant au niveau de gradient le plus élevé. Cette méthode donne d'assez bons résultats, pourvu que les niveaux de gradients pris en compte ne soient pas trop faibles.

Cette solution a malheureusement l'inconvénient d'être très longue. De plus elle n'apporte pas de solution satisfaisante au problème de la détection du contour des facettes. Elle est néanmoins intéressante en ce sens qu'elle



(a) - cartes topographiques



(b) - paire stéréoscopique

permet d'envisager une méthode plus générale de résolution du problème.

2.3.3.3 - Nouvelle méthode - détection des contours.

Un objet quelconque dans une image se détache de son environnement s'il présente un niveau de gris suffisamment homogène et relativement différent du fond ou des objets adjacents. L'objet est délimité par un contour. Ce contour se caractérise par une transition assez rapide des valeurs de gris. Autrement dit, un contour se caractérise par une augmentation du module du gradient de l'image. L'intérieur d'un objet aura donc un module de gradient minimum. Les objets détectés dans une image de fracture ne correspondent pas toujours à des facettes. Une zone de flamboiement d'arête constitue par exemple un objet individualisable. De la même façon, une facette peut être segmentée par les rivières et les arrachements qu'elle présente. Les facettes de la fracture devront être déterminées ultérieurement à partir de la segmentation, par des considérations de taille et d'intégrale de gris à l'intérieur des zones ainsi délimitées.

2.3.3.3.1 - Détection des minima de gradient.

Nous appelons désormais g , la fonction module du gradient de l'image. On a donc :

$$g(n) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

f étant la fonction de luminance au point $n(u, v)$.

Le graphe de g dessine une surface topographique. Nous utiliserons par la suite des termes géographiques tels que dôme, cuvette, ligne de partage, etc. Ces termes seront tous, sauf indication contraire, relatifs à la surface topographique dessinée par le graphe de la fonction g , et non à la surface topographique réelle de la fracture. Un minimum de la fonction g est une cuvette topographique. Imaginons un observateur parcourant la surface topographique dessinée par la fonction g . Cet observateur atteint une cuvette lorsqu'il ne peut plus atteindre une altitude plus basse sans être obligé de remonter. La figure 9 illustre cette situation.

Appelons G , le graphe de g , c'est-à-dire l'ensemble de R^3 , consisté par les triplets $(n(u, v), g(n))$. Un point $M(n, g(n))$ de G est donc un point minimum si :

- ou bien $\exists N(y, g(y)) \in G$, tel que $g(y) < g(n)$.

Dans ce cas, M est simplement le point le plus bas du graphe.

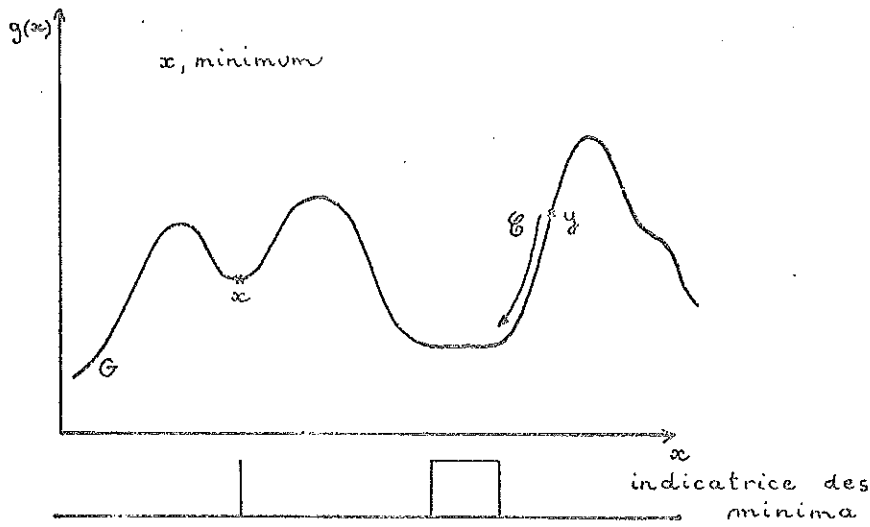


Figure 9

- ou bien si :

$\forall N (y, g(y)) \in G$ avec $g(y) < g(n)$. Il n'existe pas de chemin $\mathcal{C}(M, N)$ d'extrémités M et N sur G tel que :

$$P (z, g(z)) \in \mathcal{C}, g(z) \leq g(n).$$

Toute composante connexe de l'ensemble des point M du graphe G vérifiant cette définition constitue ce que l'on appelle un minimum de la fonction g.

Il est facile de voir que si 2 points P (y, g(y)) et Q (z, g(z)) appartiennent au même minimum, alors $g(y) = g(z)$.

Cette définition fournit également une méthode opératoire de détection des minima. En effet, on ne dispose pas, dans l'analyseur de texture de la fonction g, mais d'une suite de "coupes" de cette fonction à différents niveaux. Chaque "coupe" est l'ensemble X_i des points x tel que g(x) soit inférieur ou égal à h_i :

$$X_i = \{ x : g(x) \leq h_i \}$$

Considérons deux coupes successives de la fonction g, X_i et X_{i+1} (figure 10). L'ensemble $X_{i+1} - X_i$ est l'ensemble des points x du graphe tels

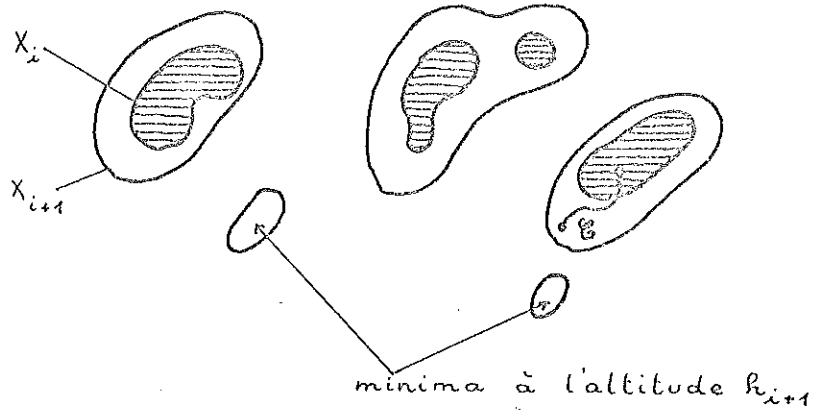


Fig. 10 - Détermination des minima.

que $g(x) = h_{i+1}$. La définition d'un minimum montre que toute composante connexe de X_{i+1} dont l'intersection avec X_i est vide est un minimum. En effet pour tout point appartenant à cette composante, il n'existe pas de chemin "descendant" assurant la connexion avec X_i , et donc a fortiori avec tout X_j , $j < i$ puisque $X_j \subset X_i$ si $j < i$.

2.3.3.3.2 - Reconstitution des bassins versants.

Considérons un point $P(x, g(x))$ quelconque du graphe G . Ce point sera lié à un minimum donné s'il existe au moins un chemin d'extrémité P et Q (Q , point quelconque du minimum) tel que pour tout point $R(z, g(z))$ de ce chemin, on ait :

$$g(z) \leq g(x)$$

Un point de la surface topographique est donc lié à un minimum donné s'il existe un chemin descendant permettant d'atteindre ce minimum, partant du point considéré. On peut montrer que tout point du graphe est lié à un minimum au moins. Par contre, un point peut être lié à plusieurs minima.

A chaque minimum, on peut lui faire correspondre sa zone d'influence, c'est-à-dire l'ensemble des points du graphe liés à ce minimum et à lui seul. On obtient ainsi l'ensemble des bassins versants, les frontières de ces bassins constituant les lignes de partage des eaux. Ces lignes de partage correspondent aux contours des zones homogènes de l'image. La figure 11 montre le résultat de l'opération.

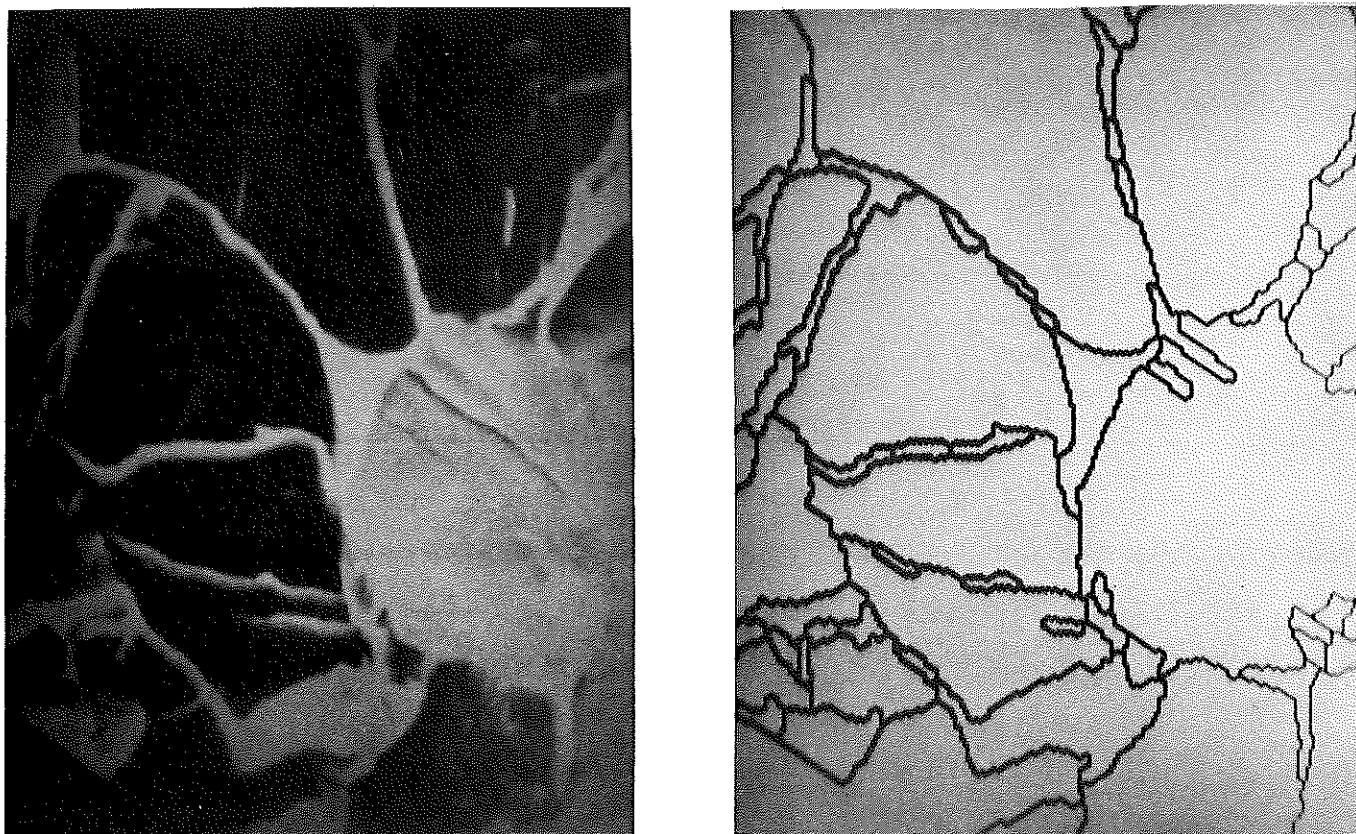


Fig. 11 - Segmentation de l'image.

Ce processus fournit les contours des zones homogènes pour les deux clichés stéréoscopiques. La détermination du relief peut donc s'effectuer par suivi des contours exactement comme le ferait un opérateur à l'aide d'un curseur (mesures type IGN). Il est alors aisé de calculer l'orientation d'une facette, en utilisant les cotes des points de sa frontière. De même toutes les mesures classiques de la métallographie quantitative sont alors réalisables.

Il est important de noter qu'il n'y a pas identité entre ces objets détectés et les facettes pour les raisons déjà mentionnées. Comme on peut le constater sur la figure 11, les zones de flamboioement d'arêtes par exemple sont délimitées, car elles correspondent à des minima de gradient. Cette délimitation apparaît également sur les rivières des facettes. Mais un contour de facette est toujours pris en compte. Le résultat final est donc une sursegmentation de l'image. Cette sursegmentation n'est pas gênante car il est toujours possible d'y remédier ultérieurement par des considérations de taille de facettes, d'orientation entre facettes adjacentes ... ou par intervention d'un opérateur gommant à l'aide d'un crayon électronique les objets parasites !

3 - DISCUSSION.

Nous avons exposé en détail les différentes étapes de la mise au point d'une technique d'analyse d'image adaptée. La raison en est la suivante : ce qui paraissait initialement être un problème de mesure automatique des caractéristiques géométriques d'objet qui pour le métallurgiste sont clairement définies (facettes de clivage ici), s'est avéré être un problème de reconnaissance des formes (d'intelligence artificielle) particulièrement difficile.

La première étape correspond à une analyse très classique en métallographie qui consiste à définir un objet ou une phase à partir de sa couleur : le critère de choix est donc alors la luminescence de l'image et de plus on admet implicitement que deux objets homologues sur les clichés stéréoscopiques ont des luminances identiques. Cette démarche aboutit à un échec dont l'analyse (cf. § 2.3.2.1) conduit à travailler sur les variations de luminance (gradient). On a vu que cette méthode délimite dans l'image des zones d'intérêt qui correspondent aux forts contrastes. On aboutit toutefois là encore à une impasse car la méthode ne comporte pas en elle-même une reconnaissance des objets ou des formes à analyser (cf. 2.3.2.2.5). L'élaboration d'une méthode comportant avant tout une phase d'"extraction" de forme est donc indispensable. A partir d'une recherche des minima locaux de gradient, on a vu que l'on pouvait individualiser des objets permettant, dans chaque image de la paire stéréoscopique, de reconstituer les facettes de l'image.

Si la méthode présentée ci-dessus semble prometteuse, de nombreux problèmes restent encore à résoudre. Le premier d'entre eux est le bruit de fond initial induisant sur les images de contours de nombreux artefacts. La solution de ce problème consisterait à stocker d'emblée l'ensemble de l'image numérisée et à effectuer un prétraitement de cette image, afin d'en éliminer le bruit.

Le deuxième problème consiste à faire correspondre les facettes homologues des deux images après segmentation. Les critères de correspondance ne sont pas simples. L'inclinaison de l'échantillon entre les deux clichés fait que deux facettes homologues sont déformées. Des critères quantitatifs (par exemple mesure des aires) sont assez peu fiables. Le seul paramètre supposé constant sur les deux images est le diamètre apparent vertical puisque cette direction correspond à l'axe de tilt.

Dans l'immédiat on préfère s'orienter vers des programmes semi-automatiques, ou après segmentation des images, l'opérateur désigne à la machine les facettes correspondantes des deux images.

Ces procédés semi-automatiques permettent aussi de résoudre en partie les problèmes posés par la présence de bruit.

Les difficultés rencontrées dans la mise au point de la méthode d'analyse n'ont pas permis de réaliser, dans les limites de cette action concertée, les mesures prévues sur les surfaces de rupture. De plus, une paire de clichés stéréoscopiques est actuellement proche de l'heure et compte tenu du volume d'observations nécessaires (cf. plus loin) pour caractériser correctement la surface de rupture, il n'est pratiquement pas envisageable de les mener à bien en l'état actuel des choses. Pour cela l'Ecole des Mines met actuellement au point des équipements devant permettre de réduire de manière très importante la durée d'exploitation d'une part, et d'autre part le bruit lié à la mémorisation des niveaux de gris dont les effets néfastes ont été signalés.

Pour ces raisons les mesures prévues seront effectuées ultérieurement, mesures dont l'intérêt est renforcé par les résultats des essais mécaniques : en effet on constate que la seule donnée des tailles de grains ne permet pas d'interpréter le comportement au choc des différents traitements, en particulier dans le cas des échantillons laminés à froid : ces échantillons, bien qu'ayant des fractions volumiques de grains, ayant un plan {100} parallèle au plan moyen de la rupture, deux fois plus grandes que les autres, sont cependant moins fragiles qu'on aurait pu le penser. Il est probable que l'explication se trouve dans les valeurs des tailles des facettes de clivage et surtout dans les désorientations entre facettes voisines, désorientations qui vont conditionner la propagation de la rupture par clivage, ou son réamorçage d'un grain à un autre. Nous disposons pour cela d'environ 120 paires stéréoscopiques, ce qui devrait nous permettre d'avoir une statistique suffisante sur ces paramètres. Nous nous contenterons ici de ces quelques considérations.

4 - CONCLUSIONS.

On a mis au point des méthodes permettant de traiter automatiquement, à l'aide de l'analyseur de textures T.A.S., des clichés stéréoscopiques de surfaces de rupture. Les démarches sont très différentes selon que l'on veut établir une carte cotée de la surface ou analyser des constituants sur cette surface. Dans ce dernier cas, l'identification des constituants à mesurer doit se faire conjointement à l'analyse du relief : on ne peut demander à un appareil d'extraire d'un couple de clichés stéréoscopiques des objets qu'il ne connaîtrait pas encore. Là est la principale difficulté de ce type d'analyse.

Les algorithmes développés sont encore d'une exécution trop longue : les développements actuellement en cours sur l'appareillage doivent permettre de réduire le temps d'exécution à quelques minutes.

Ces méthodes devraient alors nous permettre d'affiner la compréhension des phénomènes de rupture fragile dans un acier extra doux dans un premier temps et de structures plus complexes par la suite (structures de trempe).

REMERCIEMENTS.

Nous tenons à remercier tout particulièrement M. STEER pour son importante participation à la partie expérimentale de ce travail et notamment pour les raffinements apportés à la réalisation des micrographies à balayage.

Que MM. BOURGEOT, GRUMBACH, PARNIERE, ROESCH, SERRA, THOMAS et TIXIER trouvent également ici l'expression de notre gratitude pour de fructueuses discussions.

BIBLIOGRAPHIE

- S. BEUCHER et F. MEYER - Méthodes d'analyse de contrastes à l'analyseur de textures. Proceedings - Congrès AFCET-IRIA, Reconnaissances des formes et traitements des images (février 1978).
- S. BEUCHER et T. HERSANT - Détection du relief de fractures métalliques par corrélation numérique d'images. Proceedings - Symposium International de Métallographie Quantitative, C.E.F., Florence (21-23 novembre 1978).
- S. BEUCHER et C. LANTUEJOUL - Sur l'utilisation des lignes de partage des eaux en détection de contours. Séminaire Détection de contours - IRISA, IRIA, CCETT - Rennes (septembre 1979) (à paraître).
- H. DIGABEL - Manuel de programmation de l'analyseur de texture AT4 en langage MORPHAL - C.M.M., note interne (1975).
- H. DIGABEL et J. SERRA - La covariance continue.
Fascicules de morphologie mathématique appliquée. C.M.M.
- H. DIGABEL et C. LANTUEJOUL - Iterative algorithms.
Analyse quantitative des microstructures en sciences des matériaux, biologie et médecine. Dr. Riederer-Verlag, Stuttgart (1978).
- S.M. EL SOUDANI - Metallography (1978), 11, 247-336.
- P.G.T. HOWELL et A. BOYDE - Comparison of various methods for reducing measurements from stereo-pair scanning electron micrographs to "Real 3-D data". University College, London.
- T. KANEKO et F. TERASAKI - Effect of texture on the toughness of pure iron. Transactions ISIJ (1975), 15, 628-636.
- J.P. NAYLOR et P.R. KRAHE - Cleavage planes in lath type bainite and martensite.
Met. Trans. (mars 1975), 594-598.
- J. SERRA - Introduction à la morphologie mathématique.
C.M.M., Ecole des Mines de Paris (1969).
- J. SERRA - Analyse des fonctions à peu près en tout ou rien.
Rapport interne.
- F. TERASAKI et H. OHTANI - Study on brittle fracture surfaces formed at low temperature in relation to microstructure of low carbon steels. Transactions ISIJ (1972), 12, 45-53.

Tableau I

	Traitement	Niveau ductile ND	Température de transition TK (50 % cristallinité) (°C)	Taille des grains (µm)	Teneur en perlite (%)
1	1000°C 30'/Kieselguhr	220	+ 20	32	1
2	1100°C "	245	+ 40	49	2
3	1200°C "	> 100	+ 60	58	2
4	LAF 65 % + recuit 1 h à 700°C	> 300	- 15	DN : 11,2 DL : 15,5	0
5	LAF 35 % + recuit 100 h à 700°C	240	- 15	32	0,5

Tableau II

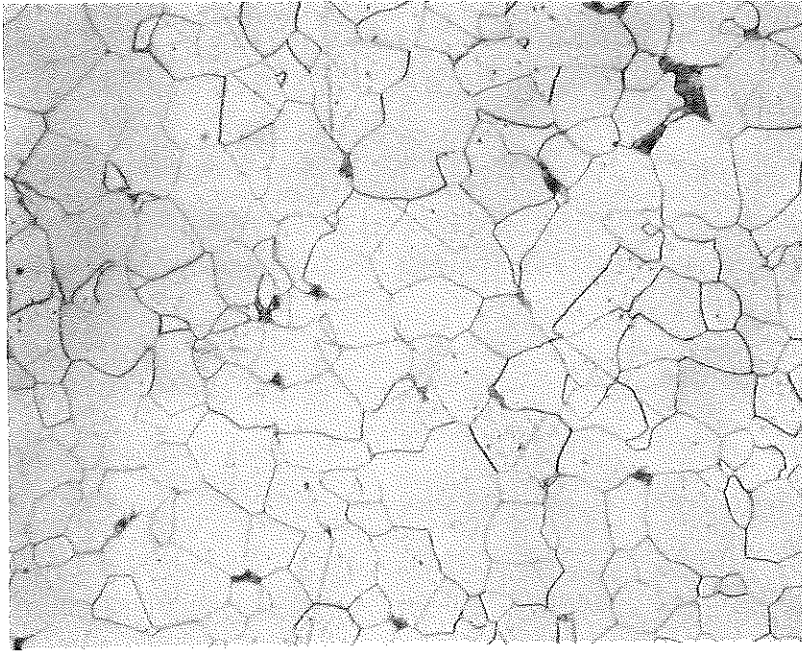
Traitement	I {200} // (DN, DT) I {200} EST
4	2,161
5	2,178

Tableau III

Pour les notations se reporter à la planche VI et à l'Annexe I.

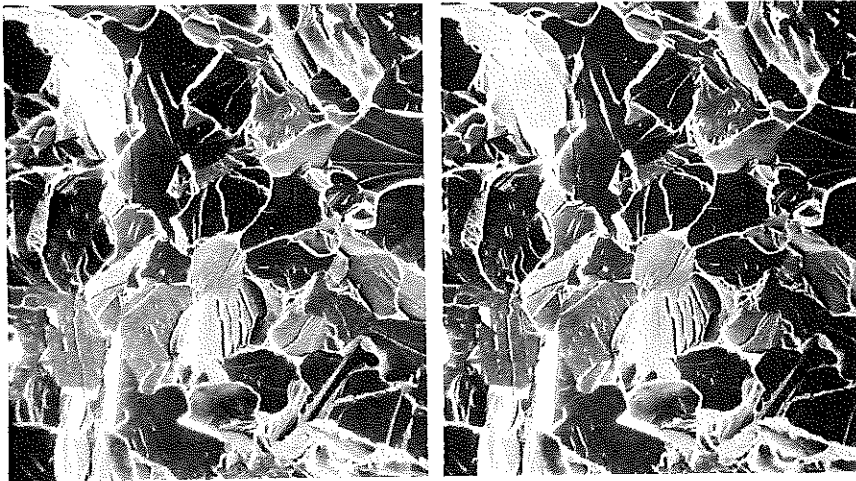
Plans	Mesures manuelles (en degrés)				Mesure à l'aide du TAS (en degrés)	Valeurs réelles (angles du diamant)
	1	2	3	4		
BCD - ADC	4	2	12	2	non déterminé	0
ADE - BCE	131	142	128	126	137	136
AEC - BDE	129	139	126	126	134	136
ADE - DBE	143	152	140	141	143	149,3
AEC - BCE	142	150	138	142	121	149,3

N.B. - On entend par valeurs réelles les angles correspondants sur le diamant Vickers. Ils peuvent différer de quelques degrés sur l'empreinte (retour élastique, inhomogénéité de la déformation, etc.). Les mesures manuelles sont bien entendu les plus proches de la réalité et on peut considérer les mesures automatiques comme satisfaisantes.



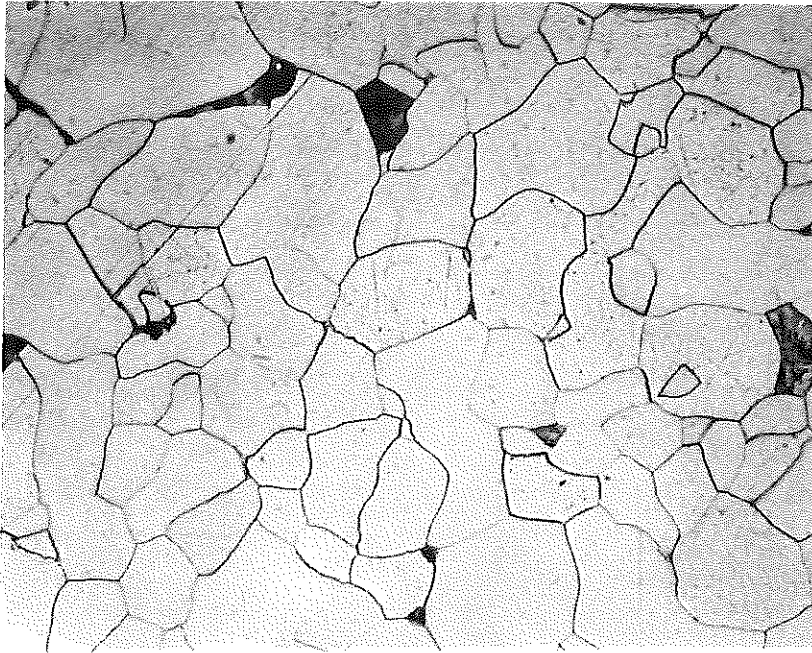
Micrographie optique

X 200



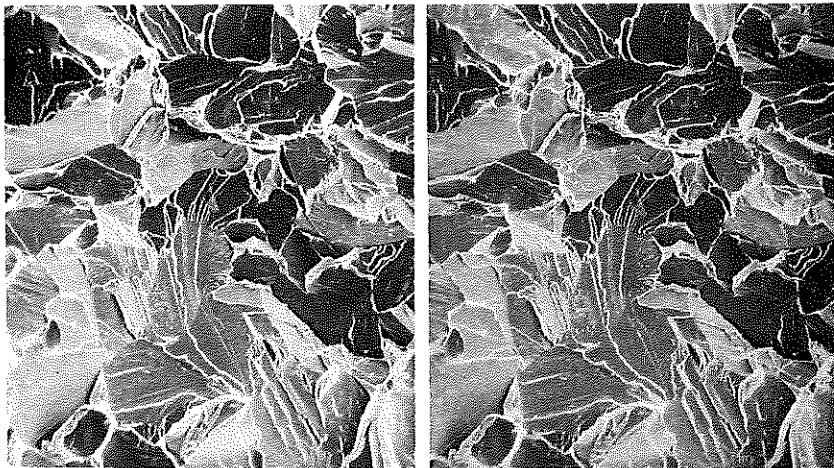
Clichés stéréoscopiques MEB X 240

Planche I - Traitement 1 - austénitisation 1000°C pendant 30' - refroidissement Kieselgühr.



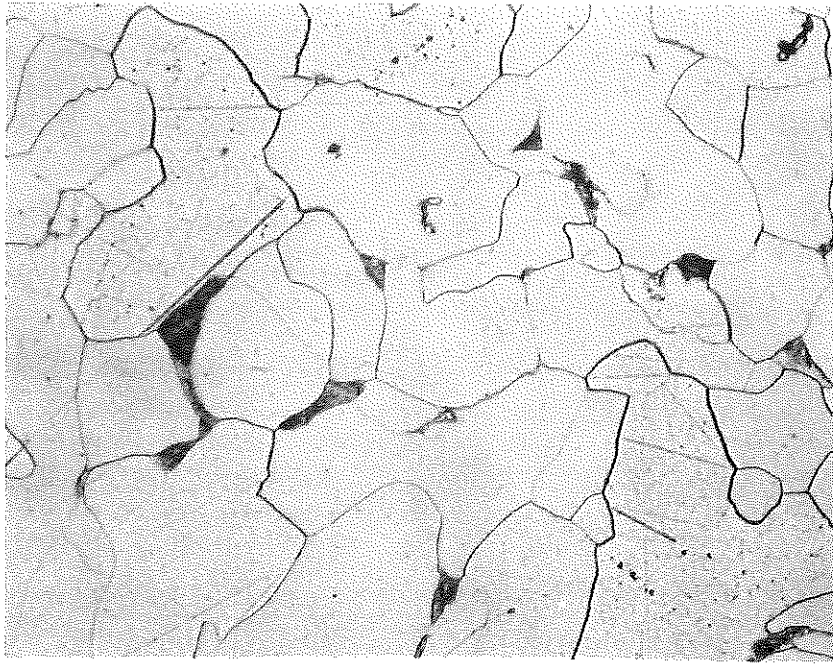
Micrographie optique

X 200



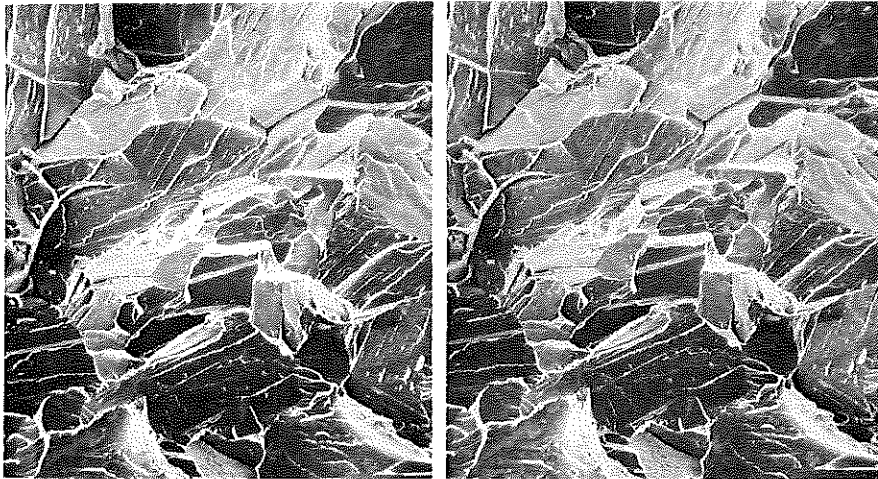
Clichés stéréoscopiques MEB X 120

Planche II - Traitement 2 - austénitisation 1100°C pendant 30' -
refroidissement Kieselgühr.



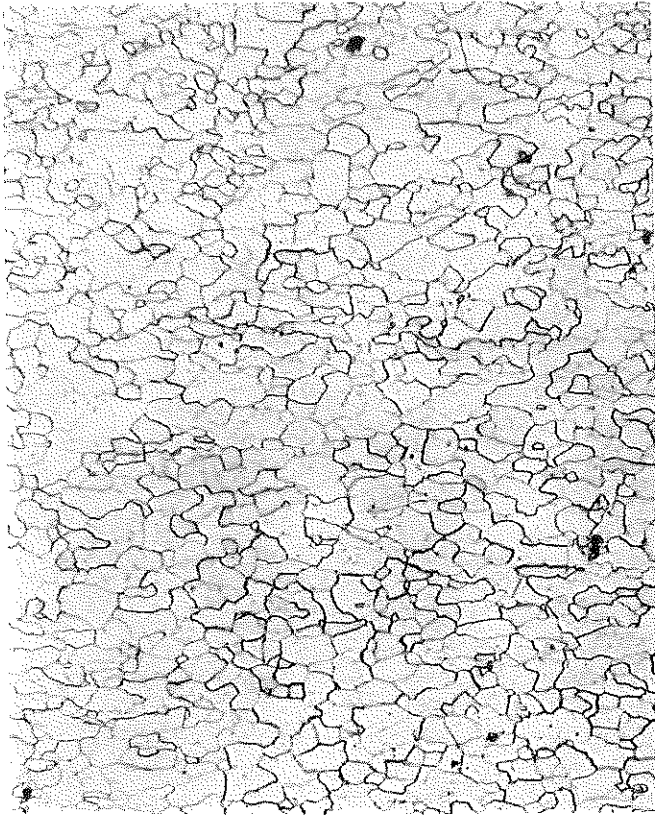
Micrographie optique

X 200



Clichés stéréoscopiques MEB X 120

Planche III - Traitement 3 - austénitisation 1200°C pendant 30' -
refroidissement Kieselgühr.



Micrographie optique X 200

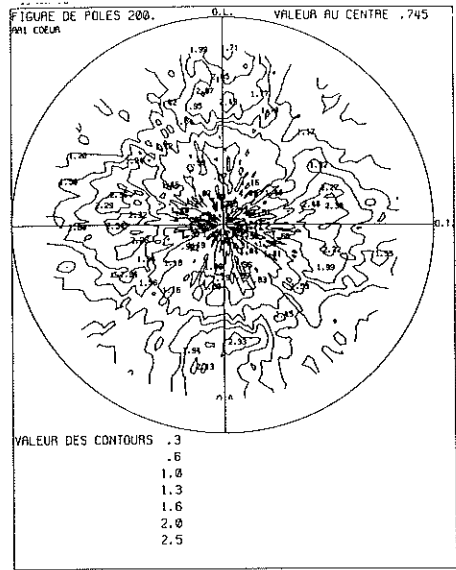
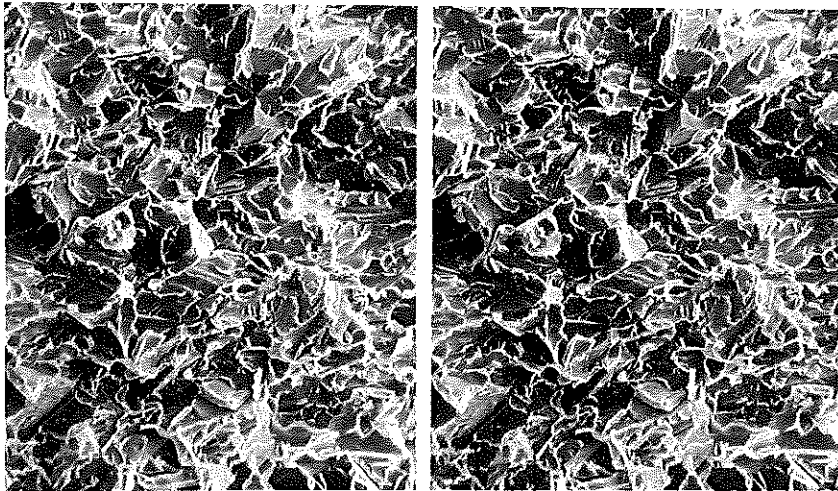


Figure de pôles {200}



Clichés stéréoscopiques MEB X 240

Planche IV - Traitement 4 - laminage à froid 60 % - recuit 700°C - 1 h.

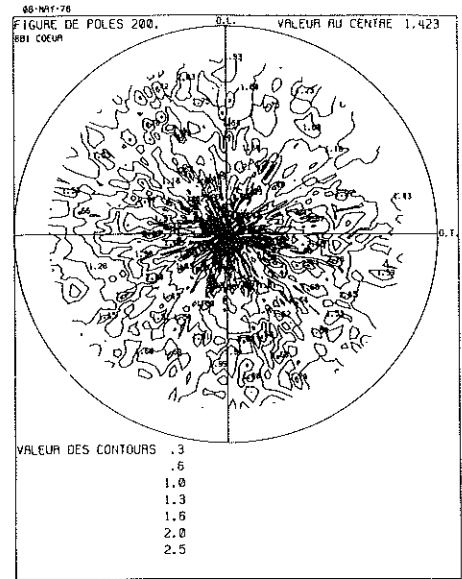
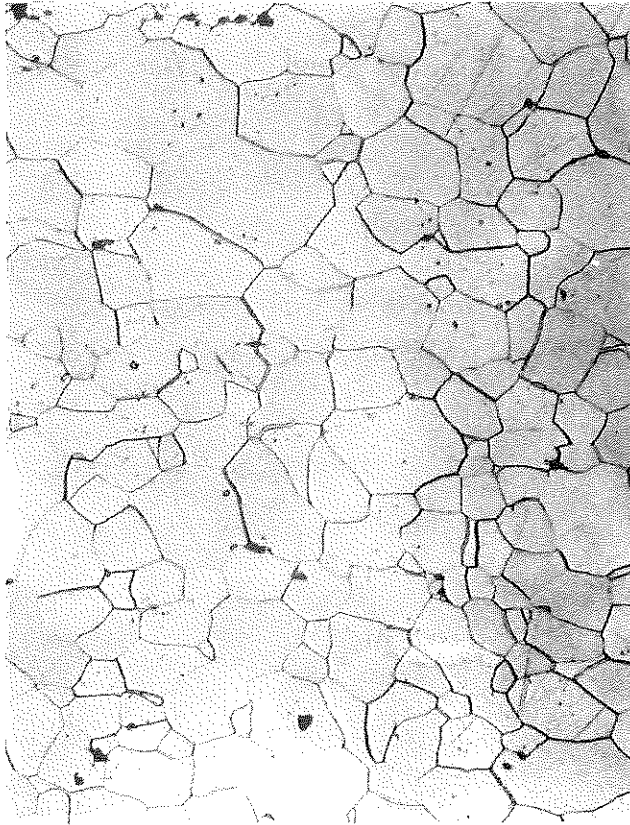
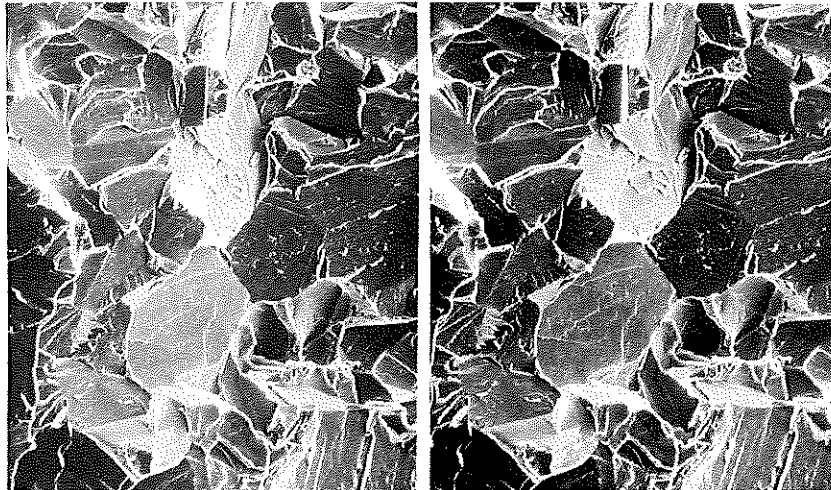


Figure de pôles {200}

Micrographie optique X 200

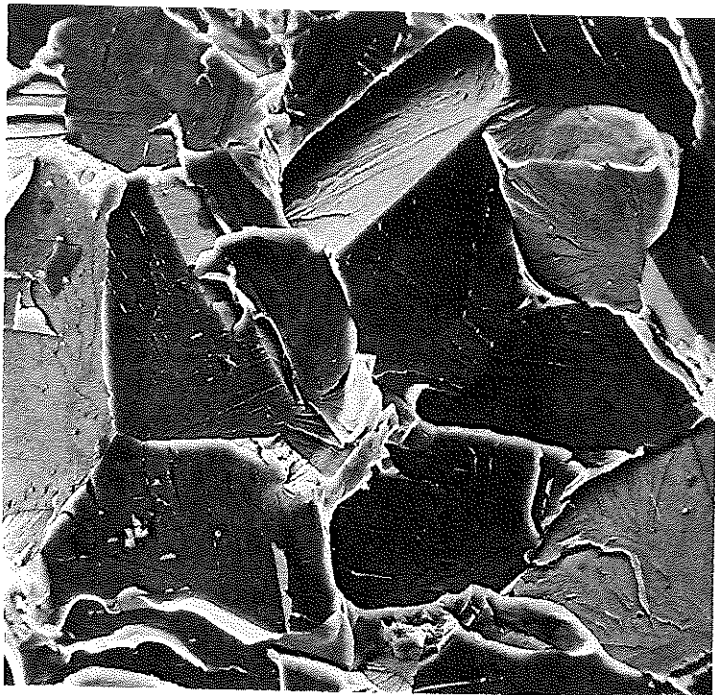


Clichés stéréoscopiques MEB X 240

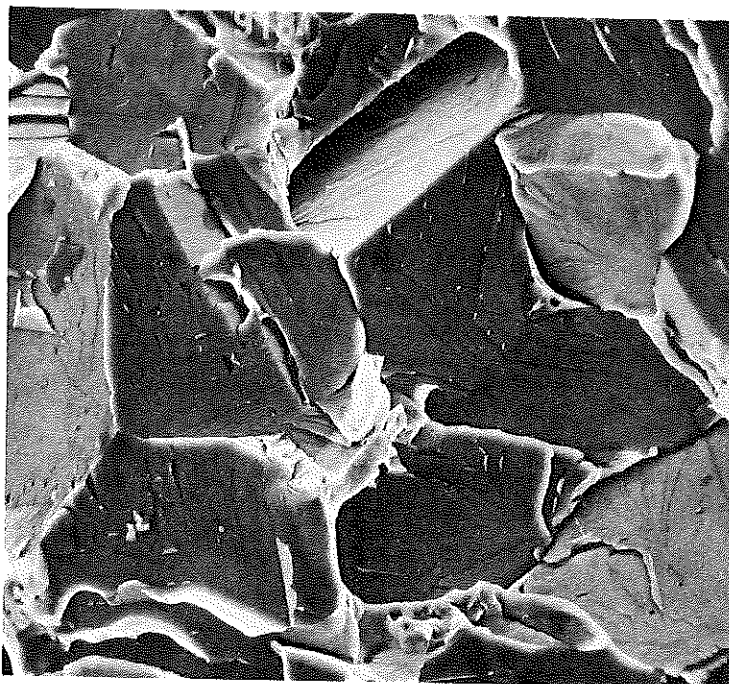
Planche V - Traitement 5 - laminage à froid 35 % - recuit 700°C - 100 h.

Effet du réglage du contraste alternatif.

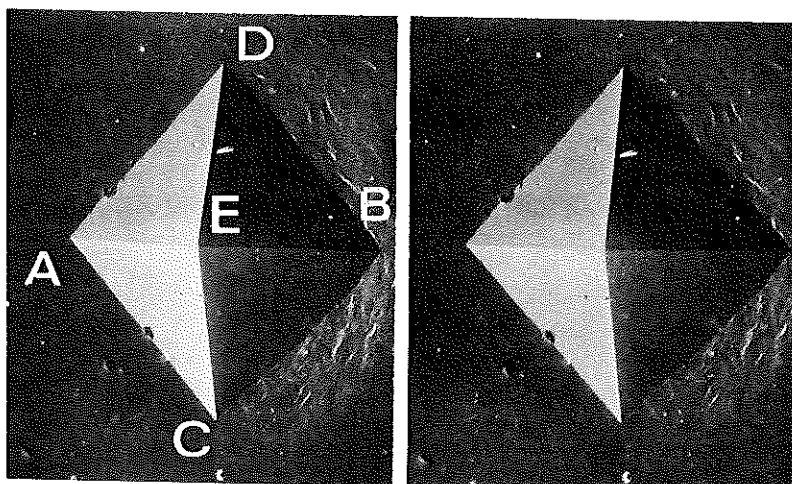
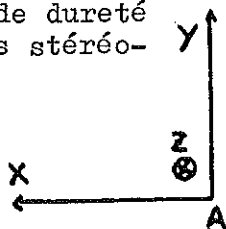
a - avec contraste alternatif
X 700



b - sans contraste alternatif
X 700

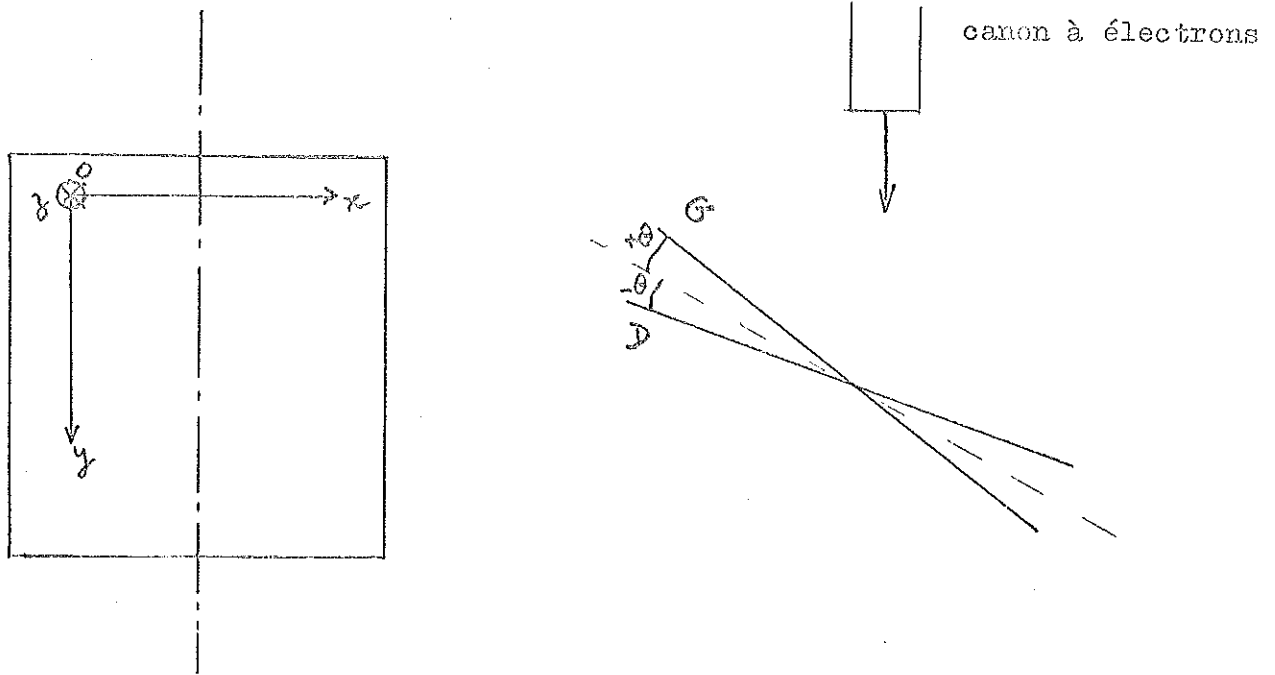


Empreinte test de dureté
Vickers. Clichés stéréo-
scopiques.
X 120



ANNEXE I

FORMULES STEREOSCOPIQUES



Dans le repère Oxyz $\left\{ \begin{array}{l} - Oy \text{ axe de tilt} \\ - O \text{ point arbitraire de l'espace} \end{array} \right.$

Les coordonnées d'un point de la surface de rupture s'obtiennent à partir de mesure sur la paire stéréoscopique par

$$x = \frac{x_G}{M \cos \theta} + \frac{\Delta P}{2 M \cos \theta}$$

$$y = \frac{y_G}{M}$$

$$z = \frac{\Delta P}{2 M \sin \theta}$$

où ΔP est la parallaxe entre l'origine O et le point (x, y, z) ,

θ est le demi-angle de tilt,

M est le grossissement.

Le choix du point O est ici le suivant : c'est un point quelconque de la surface de rupture, celle-ci étant placée en position intermédiaire par rapport au couple stéréoscopique, la photo de gauche étant

"tiltée" de $+\theta$ par rapport à cette position intermédiaire et celle de droite de $-\theta$, autour de Oy . Etant donné que l'on ne travaille pas sur une micrographie prise à cette position intermédiaire, ceci explique l'expression permettant le calcul de x ; l'ordonnée y n'étant pas affectée. L'axe Oz est orientée de manière à rendre le repère $Oxyz$ direct.

Les facettes étant assimilées à des plans, ceux-ci sont déterminés par 3 points :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix}$$

La normale \vec{n} à ce plan fait un angle ψ avec le plan xOy tel que

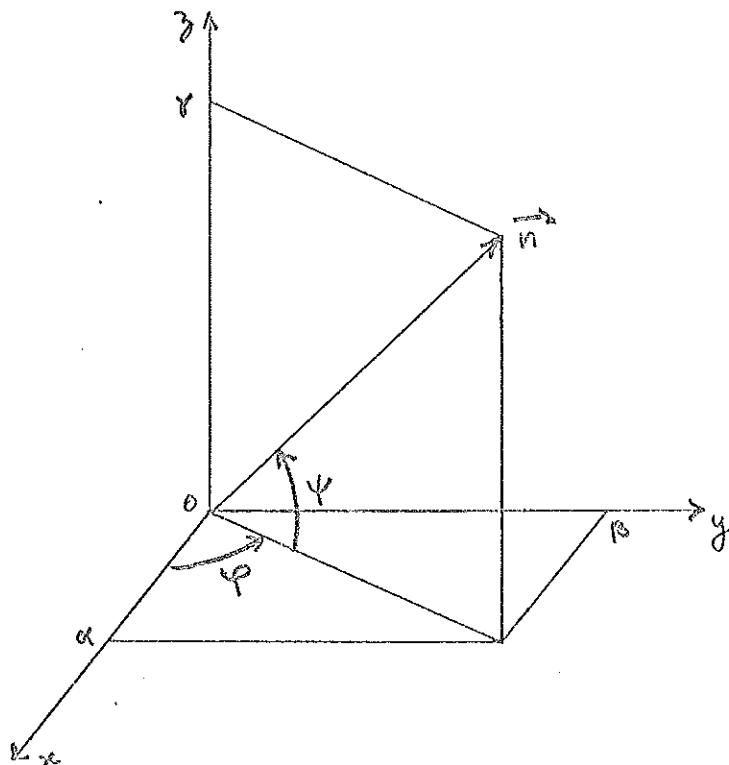
$$\cos \psi = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}$$

avec $\alpha = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1)$

$\beta = (x_3 - x_1)(z_2 - z_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1)$

$\gamma = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)$

C'est cette quantité $\cos \psi$ qu'on cherche à déterminer car elle donne le rapport entre la surface d'une facette et celle de la projection.



$$\text{et } \cos \varphi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

La direction du plan est déterminée par les angles φ et ψ .
L'angle A entre deux plans 1 et 2 s'obtient en calculant le produit scalaire de leurs normales :

$$\cos A = \cos \psi_1 \cos \psi_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \psi_1 \sin \psi_2$$

A étant l'angle entre les normales, on prendra $\pi - A$ comme angle entre les plans.

A N N E X E II

PRESENTATION DE LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE
ET DE L'ANALYSEUR DE TEXTURES

INTRODUCTION.

Il est important de pouvoir disposer de renseignements sur la structure géométrique interne des matériaux, dans la mesure où cette information peut contribuer à une meilleure connaissance de leur comportement.

Une bonne partie de ces renseignements est le plus souvent de nature qualitative : les observations permettent de décrire la forme des objets par référence à des formes types. On parle de pores sphériques, de cristaux en aiguilles ou de chapelets d'inclusions. Cependant, de nombreuses structures présentent des configurations géométriques d'une grande complexité et d'une grande variabilité pour un produit donné.

Les premiers renseignements quantitatifs sur les structures géométriques ont été déterminés par comptage manuel, ce qui limitait les possibilités de mesure. Dans les années 60 sont apparus des appareils réalisant de manière automatique le même type de mesure. A cette époque, J. SIERRA et G. MATHERON ont développé les bases de la morphologie mathématique, en proposant une conception originale élargie de l'étude des objets géométriques. Cette théorie s'est concrétisée dans la réalisation d'un appareil, l'analyseur de textures, qui transpose à l'analyse d'images les principes de la morphologie mathématique. Cet appareil, développé par l'IRSID et l'Ecole des Mines de Paris, est fabriqué et commercialisé par la Société LEITZ sous le nom de T.A.S. (Texture Analysis System).

Le but essentiel de la morphologie mathématique est de donner les moyens d'obtenir des renseignements quantitatifs cohérents et significatifs sur des structures spatiales. Ces renseignements sont toujours le résultat d'une mesure effectuée après une certaine transformation de l'objet étudié. Considérons par exemple le renseignement morphologique obtenu sur une population de particules solides après tamisage : l'opération morphologique consiste à filtrer les particules par des tamis de taille croissante. La mesure est ici le poids de chaque fraction granulométrique et le renseignement morphologique obtenu est la répartition des particules en différentes classes granulométriques.

Les transformations morphologiques et les mesures admissibles ne

peuvent pas être quelconques, en raison principalement des contraintes expérimentales imposées par l'étude des structures; une structure géométrique nous est le plus souvent accessible par une image, qui a été obtenue localement, après par exemple préparation d'un échantillon plan poli, et examen d'une petite zone au microscope. De plus, les grandeurs mesurées doivent être additives pour que le calcul des moyennes arithmétiques nécessaires pour estimer correctement une grandeur caractéristique du matériau ait un sens. Il faut également qu'aucun biais ne soit introduit par le fait qu'une partie de la structure examinée coupe les bords du champs d'analyse.

Les opérations et les mesures définies en morphologie mathématique permettent de s'affranchir correctement de ces contraintes.

NOTIONS D'ÉLÉMENT STRUCTURANT. ÉROSION.

Nous avons parlé tout à l'heure de la comparaison entre l'aspect morphologique présenté par une structure et des formes types. Ce type de démarche est transposé en morphologie mathématique dans la notion d'élément structurant : un élément structurant est un ensemble géométrique de forme et de taille donnée, qui est déplacé par translations successives à travers la structure; pour chaque position de son centre est enregistrée la réponse à une question logique concernant la position relative de l'élément structurant et de la structure. Par exemple, la question posée peut être la suivante : l'élément structurant implanté en un point de l'espace est-il totalement contenu dans l'objet X étudié ? L'ensemble des points pour lesquels la réponse est positive constitue un nouvel objet qui est le résultat d'une transformation morphologique appelée érosion.

On constate que le résultat de l'opération portant sur un même objet dépend de la taille de l'élément structurant, et également de sa forme. En particulier, l'érosion par un élément structurant hexagonal régulier s'effectue de manière isotrope. Cette opération apporte donc des renseignements sur la taille des objets vus en section indépendamment de leur orientation. Au contraire, des érosions par des segments orientés sont sensibles aux anisotropies géométriques de structure.

L'opération d'érosion que nous venons de définir est indépendante de la notion de particules isolées, puisqu'elle ne fait intervenir que des conditions logiques. Elle peut en particulier être appliquée à une phase interconnectée comme par exemple une matière solide contenant des pores individualisés. On montre alors que l'érosion d'un ensemble correspond à une autre opération, appelée dilatation, portant sur l'ensemble complémentaire du premier.

Pour un milieu poreux, éroder les pores par des éléments structurants convexes revient à caractériser leur taille. Dans ce cas, faire des érosions de la phase solide revient à caractériser la taille de la phase solide, ou la répartition des pores. La synthèse de la taille et de la répartition est étudiée au moyen d'érosions par un doublet de points orienté.

Enfin, nous avons indiqué que le résultat d'une transformation morphologique est une nouvelle image. Elle peut donc être soumise à d'autres transformations d'images. En combinant judicieusement le choix des éléments structurants successifs employés, on peut parvenir à isoler dans une structure les éléments répondant à certains critères de forme et de taille. Un exemple très simple d'opérations morphologiques successives est donné par l'opération d'ouverture : dans une première étape, la structure considérée est érodée. Les parties les plus fines de la structure ont disparu. Les autres parties ont vu leur taille diminuer. L'opération suivante consiste à dilater le résultat de l'érosion par l'élément structurant qui a servi à l'érosion. L'opération d'ouverture (érosion suivie de dilatation) a éliminé les parties de la structure trop petites pour contenir l'élément structurant, les autres parties demeurant intactes. Pour une structure constituée d'éléments de même forme que l'élément structurant, l'opération d'ouverture est tout-à-fait analogue à une opération de tamisage.

Nous n'avons parlé jusqu'à maintenant que de transformations morphologiques effectués sur une structure. Il nous faut définir les grandeurs de base qui apportent des renseignements quantitatifs sur les structures.

MESURES MORPHOLOGIQUES DE BASE.

Les mesures morphologiques de base accessibles de manière correcte à l'expérience sur des images planes sont peu nombreuses. Chacune d'elle est associée à un élément structurant de petite taille.

- La surface occupée par une phase est proportionnelle au nombre de points de la trame d'analyse qu'elle contient. Elle est déterminée par érosion par un élément structurant ponctuel.

- Le nombre d'intercepts dans une direction donnée est le nombre total d'entrées dans une phase pour cette direction.

- Le nombre de connexité est le nombre de particules diminué du nombre d'enclaves qu'elles contiennent.

Ces grandeurs sont le plus souvent utilisées sous la forme de

grandeurs spécifiques. On admet alors que les zones effectivement analysées (champs de mesure, sections polies) sont suffisamment représentatives de l'ensemble de la structure. Cette représentativité peut d'ailleurs être contrôlée par un calcul statistique qui permet de s'assurer de la validité de l'échantillonnage adopté.

Les grandeurs spécifiques mesurées sur des images planes permettent d'estimer certaines grandeurs spécifiques de la structure tridimensionnelle étudiée, par le biais de relations stéréométriques. Ainsi, la proportion volumique est estimée à partir de la proportion de surface occupée par une phase. De même, la surface spécifique (ou surface des parois d'une phase par unité de volume) est obtenue à partir du nombre spécifique d'intercepts.

Les grandeurs de base de la morphologie mathématique sont mesurées après transformation morphologique, les proportions de surface occupée par une phase après érosion par des segments de taille croissante, ou après des ouvertures par des hexagones de taille croissante, sont par exemple autant de renseignements quantitatifs sur la taille des éléments composant la structure.

L'ANALYSEUR DE TEXTURES.

Il a été conçu pour mettre en oeuvre les opérations de la morphologie mathématique.

Les images qu'il traite sont obtenues par une caméra de télévision reliée à un microscope optique ou à un dispositif macroscopique. Toutes les échelles de structure peuvent donc être étudiées, pourvu que l'on dispose d'un échantillon soigneusement préparé ou d'un bon document photographique.

L'image observée est tout d'abord convertie en un signal électrique d'intensité proportionnelle à l'intensité lumineuse. Après comparaison du signal à des seuils de gris fixés par l'opérateur, le signal continu est converti en un signal binaire correspondant à l'absence ou la présence de la phase considérée. Le nouveau signal est ensuite échantillonné à des intervalles de temps réguliers avant d'être envoyé dans la logique des transformations morphologiques et de comptage de l'appareil.

L'image initiale continue est donc transformée à une image binaire et digitalisée, comportant environ 400.000 points, qui forme en quelque sorte une carte de l'échantillon pour le niveau de gris choisi. Le traitement de l'image utilise un système de registres à décalages qui mémorise de manière dynamique une partie de l'image seulement. Cette solution donne à l'appareil

un rythme de mesure très rapide, qui est en fait celui du balayage de la caméra de télévision. Les versions les plus récentes de cet appareil peuvent mémoriser plusieurs images complètes, et sont pilotées par un calculateur, ce qui donne, entre autres, la possibilité de comparer entre elles plusieurs images ou d'enchaîner une suite de transformations morphologiques par itérations.

ANNEXE III

```
0001 *
0002 *
0003 *   FRACTURES METALLIQUES - GRADIENTS ET RECALAGE DES COUPLES STEREO
0004 *   ****
0005 *
0006 *
0007 SIZE N1(220), N2(220)
0008 1 JUMP 1000
0009 * SOUS-PRGM CONTRASTE
0010 10 NDL (SV, SC)(BZ)
0011 15 TYPE 'ECART', I1
0012 20 I2=126-I1
0013 25 FOR K=1, I2, 1
0014 30 SLVL 1, (O, K)
0015 35 DIL 1, (SV)(BX, TR)
0016 40 M=K+I1
0017 45 SLVL 1, (M, I27)
0018 50 DIL 1, (SV)(BY, TR)
0019 55 COV 0, (BY, BZ, UN; BX, BZ, UN)(BZ, TR)
0020 60 NEXT K
0021 65 EXIT
0022 * SOUS-PRGM TRACE COURBES
0023 200 NDL (SV, SC)(BX, BY)
0024 205 FOR K=1, 220, 1
0025 210 K1=N1(K)+1
0026 215 K2=N2(K)+1
0027 220 M=K+10
0028 225 WPEN (BX)(1, K1)(M, 10)
0029 230 WPEN (BY)(1, K2)(M, 10)
0030 235 NEXT K
0031 240 TYPE 'NO PREMIERE IMAGE', NO
0032 245 SAVR *NO
0033 250 NDL (BX)(BR)
0034 255 EXIT
0035 *
0036 * PRGM PRINC
0037 1000 SFLD (220, 220)(10, 10)
0038 1010 NDL (SV, SC)(BX, BY, BZ, BR)
0039 1012 NDSK 0
0040 1015 VISU (CA, FL)
0041 1020 STOP
0042 1022 VISU (BX, BZ)
0043 1025 NDSK 0
0044 1030 CALL 10 (SPRM CONTR)
0045 1035 NDL (BZ)(BR)
0046 1040 VISU (CA, FL)
0047 1045 STOP
0048 1050 VISU (BX, BZ)
0049 1055 CALL 10
0050 1056 D=0
0051 1057 E=0
0052 1060 FOR K=1, 220, 1
0053 1065 NDL (SV, SC)(BX)
0054 1067 VISU (BX, BY, BZ, BR)
0055 1070 M=K+10
0056 1075 WPEN (BX)(220, 1)(10, M)
0057 1080 NDL (BX, BZ)(TR)(AR, N1(K))
0058 1082 D=D+N1(K)
0059 1085 NDL (BX, BR)(TR)(AR, N2(K))
0060 1087 E=E+N2(K)
0061 1095 NEXT K
0062 1096 K5=-15
```

```

0063 1097 C=(D+E)/880
0064 1098 CALL 200
0065 1100 FOR K4=0,30,1
0066 1105 K=K4-15
0067 1110 IF (K.LT.0)1115,1150
0068 1115 K3=220+K
0069 1120 A=0
0070 1125 K6=-K
0071 1130 LDC K6,(BR; , 1)(BX,TR)
0072 1135 NDL (BX,BY)(TR)(AR,N)
0073 1140 A=N/K3
0074 1145 JUMP 1180
0075 1150 K3=220-K
0076 1155 A=0
0077 1160 K6=K
0078 1161 IF (K6.EQ.0)1162,1165
0079 1162 NDL (BY)(BX)
0080 1163 JUMP 1170
0081 1165 LDC K6,(BY; , 1)(BX,TR)
0082 1170 NDL (BX,BR)(TR)(AR,N)
0083 1175 A=N/K3
0084 1180 IF (A.GT.C)1185,1195
0085 1185 C=A
0086 1190 K5=K
0087 1195 NEXT K4
0088 1197 VISU (BZ,BR)
0089 1200 IF (K5*K5-225.GE.0)1205,1215
0090 1205 IMP /,10; , 'DECALAGE TROP IMPORTANT',/
0091 1207 DEST *NO
0092 1210 JUMP 1330
0093 1215 K6=K5
0094 1220 IF (K6.LT.0)1225,1260
0095 1225 K6=-K6
0096 1230 LDC 1,(BZ; , 1 )(BZ,TR)
0097 1235 K6=K6-1
0098 1240 IF (K6.GT.0)1245,1295
0099 1245 LDC 1,(BZ; , 1 )(BZ,TR)
0100 1250 K6=K6-1
0101 1255 IF (K6.GT.0)1260,1295
0102 1260 IF (K6.GT.0)1265,1295
0103 1265 LDC 1,(BZ; , 1 )(BZ,TR)
0104 1270 K6=K6-1
0105 1275 IF (K6.GT.0)1280,1295
0106 1280 LDC 1,(BZ; , 1 )(BZ,TR)
0107 1285 K6=K6-1
0108 1290 JUMP 1260
0109 1295 EDIT K5
0110 1300 LDDR *NO
0111 1305 VISU (BZ,BR)
0112 1310 STOP CONTROLE
0113 1315 TYPE 'NO DEUXIEME IMAGE',N3
0114 1320 NDL (BZ)(BR)
0115 1325 SAVR *N3
0116 1330 STOP
0117 /*

```

```
0001 *
0002 *
0003 *
0004 *   CARTOGRAPHIE DE FRACTURES METALLIQUES
0005 *
0006 *
0007 *   ANALYSE D'IMAGES STEREOSCOPIQUES
0008 *
0009 *
0010 *
0011 *
0012 *   LE PROGRAMME CALCULE L'ALTITUDE DES ZONES ('POINTS')
0013 *   CONTRASTEES DE L'ECHANTILLON. L'AXE DE TILT DES DEUX
0014 *   IMAGES SEPARA LE CHAMP EN DEUX PARTIES EGALES. CHAQUE
0015 *   PARTIE EST TRAITEE ET CARTOGRAPHIEE SEPAREMENT.
0016 *   LES SEULS PARAMETRES A INTRODUIRE SONT :
0017 *   - LES COSINUS ET SINUS DE L'ANGLE DE TILT
0018 *   - LES REFERENCES DES DEUX IMAGES
0019 *   ATTENTION :
0020 *
0021 *   L'IMAGE 1 EST L'IMAGE PRISE LORSQUE LE BASCOLEMENT DE
0022 *   DE L'ECHANTILLON EST LE PLUS FAIBLE.
0023 *   ON SUPPOSERA QUE LA PROJECTION EST CYLINDRIQUE.
0024 *   LES IMAGES 1 ET 2 ONT PREALABLEMENT ETE STOCKEES SUR
0025 *   DISQUE. LE DRIVER UTILISE EST LE DRIVER 0.
0026 *
0027 *
0028 *
0029 1 STOP
0030 *   INITIALISATION
0031 SIZE N1(19),N2(31),N3(16)
0032 5 SFLD (220,220)(10,10)
0033 10 NOL (SV,SC)(BX,BY,BZ,BR)
0034 15 NDSK 0
0035 20 TYPE 'IMAGE 1',M1,'IMAGE 2',M2
0036 25 TYPE 'COS(ALPHA)',C,'SIN(ALPHA)',S
0037 30 VISU (BR)
0038 35 LQDR *M1
0039 40 TYPE 'SI LOAD CORRECT,TAPEZ 1-SINON,0',K
0040 45 IF (K.EQ.1)50,35
0041 50 NOL (BR)(BZ)
0042 55 LQDR *M2
0043 60 TYPE 'LOAD CORRECT',K
0044 65 IF (K.EQ.1)70,55
0045 70 VISU (BX,BY,BR)
0046 *   TITRES
0047 75 FOR L=1,2,1
0048 80 IMP :,2/,10;,'FRACTURES : CARTE TOPOGRAPHIQUE',/
0049 85 IMP 10;,'-----',2/,20;,'ECHANTILLON : '
0050 90 IMP 'IMAGES ',M1-I4,' (-) ET ',M2-I4,' (+)',/,20;,'-----',2/
0051 95 IMP 5;,'MASQUE D'ECHANTILLONNAGE : 5X5',/,5;,'CHAMP NO ',L-I1,3/
0052 100 IMP 10;
0053 105 FOR I=1,19,1
0054 110 J=95*L+5*I-75
0055 115 IMP J-I3,3;
0056 120 NEXT I
0057 125 IMP /,11;
0058 130 FOR I=1,19,1
0059 135 IMP 'I',5;
0060 140 NEXT I
0061 145 IMP 2/
0062 *   SCANNING
```

```
0063 150 FOR K=1, 44, 1
0064 155 FOR I=1, 19, 1
0065 160 N1(I)=1000
0066 165 NEXT I
0067 170 I2=5*(K+1)
0068 175 FOR J=1, 19, 1
0069 180 I1=95*L+5*J-75
0070 185 WPEN (BX)(5,5)(I1, I2)
0071 190 NOL (BX, BZ)(BY, TR)(AR, N)
0072 195 IF (N. LT. 3)575, 196
0073 196 NOL (SV, SC)(BX)
0074 197 WPEN (BX)(1,5)(I1, I2)
0075 198 NOL (BX, BY)(TR)(AR, N)
0076 199 IF (N. GT. 3)575, 200
0077 200 LDC 4, (BX; , 1 )(BX, TR)
0078 201 NOL (BX, BY)(TR)(AR, N)
0079 202 IF (N. GT. 3)575, 203
0080 203 WPEN (BX)(5,5)(I1, I2)
0081 205 LDC 15, (BY; , 1 )(BY, TR)
0082 206 LDC 15, (BX; , 1 )(BX, TR)
0083 210 FOR I=1, 31, 1
0084 215 NOL (BY, BR)(TR)(AR, N8)
0085 217 COV 0, (BY, BR, UN; BX, BY, UN)(TR)(AR, N9)
0086 220 LDC 1, (BY; , 1 )(BY, TR)
0087 222 LDC 1, (BX; , 1 )(BX, TR)
0088 223 N2(I)=100*N8/N9
0089 225 NEXT I
0090 227 CALL 900
0091 * EXTRACTION MAXIMA
0092 230 N5=0
0093 235 FOR I=2, 30, 1
0094 240 J2=I-1
0095 245 J3=I+1
0096 250 IF (N2(I). GT. N2(J2))255, 275
0097 255 IF (N2(I). GT. N2(J3))260, 275
0098 260 IF (N2(I). GT. 50)265, 275
0099 265 N5=N5+1
0100 270 N3(N5)=I
0101 275 NEXT I
0102 280 N6=0
0103 281 IF (N5. EQ. 0)575, 282
0104 282 IF (N5. EQ. 1)283, 285
0105 283 J1=N3(1)
0106 284 JUMP 360
0107 285 NOL (SV, SC)(BX)
0108 288 J2=I1+2
0109 290 J3=I2+2
0110 292 WPEN (BX)(1, 1)(J2, J3)
0111 294 DIL 10, (BX)(BX, TR)
0112 296 NOL (BX, BZ)(BY)
0113 298 LDC 15, (BX; , 1 )(BX, TR)
0114 299 LDC 15, (BY; , 1 )(BY, TR)
0115 300 J2=1
0116 301 FOR I=1, N5, 1
0117 302 J2=N3(I)-J2
0118 303 IF (J2. GT. 15)304, 308
0119 304 LDC 15, (BX; , 1 )(BX, TR)
0120 305 LDC 15, (BY; , 1 )(BY, TR)
0121 306 J2=J2-15
0122 307 JUMP 303
0123 308 LDC J2, (BX; , 1 )(BX, TR)
0124 310 LDC J2, (BY; , 1 )(BY, TR)
```

```
0125 312 NOL (BY, BR) (TR) (AR, N8)
0126 314 COV O, (BY, BR, LN; BX) (TR) (AR, N9)
0127 316 JZ=N3(I)
0128 335 IF (100*N8/N9.GT. N6) 340, 350
0129 340 N6=100*N8/N9
0130 345 N7=N3(I)
0131 350 NEXT I
0132 355 J1=N7
0133 360 N1(J)=I1+J1-136
0134 575 NOL (SV, SC) (BX)
0135 580 NEXT J
0136 585 X=I2*RC(3)/Z
0137 * IMPRESSION RESULTATS
0138 685 IMP I1;
0139 690 FOR I=1, 19, 1
0140 695 IMP ' ', 5;
0141 700 NEXT I
0142 705 IMP /, X-F6. 1, 1, 'I';
0143 710 FOR I=1, 19, 1
0144 715 IF (N1(I).EQ. 1000) 720, 730
0145 720 IMP 6;
0146 725 JUMP 740
0147 730 I3=(N1(I)-C*(95*L+5*I-195))/S
0148 735 IMP I3-I4, 2;
0149 740 NEXT I
0150 745 IMP /
0151 750 NEXT K
0152 755 NEXT L
0153 865 STOP
0154 *
0155 900 NOL (SV, SC) (BX)
0156 905 FOR I=1, 31, 1
0157 910 J1=50+I
0158 915 J2=N2(I)+1
0159 920 WPEV (BX) (1, J2) (J1, 20)
0160 925 NEXT I
0161 930 EXIT
0162 /*
```