

CENTRE DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE  
ÉCOLE DES MINES DE PARIS  
35 Rue Saint-Honoré  
77305 FONTAINEBLEAU

INSTITUT DE RECHERCHES DE LA SIDÉRURGIE FRANÇAISE  
185 Rue du Président Roosevelt  
78105 SAINT GERMAIN EN LAYE

S. BEUCHER  
M. BLANC

STEREOMETRIE DE FACIES DE RUPTURE FRAGILE.  
APPLICATION DE LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE  
À L'ANALYSE QUANTITATIVE DE SURFACE NON PLANE

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

Mars 1981

Décision d'aide n° 78.7.2444  
78.7.2445

## TABLE DES MATIERES

=====

INTRODUCTION	1
I - ANALYSE DES IMAGES	3
A/ Introduction	3
B/ Analyse des clichés. Description détaillée de la méthode	3
B-1 - Détection des contours de l'image. Ligne de partage des eaux	3
B-2 - Avertissement préliminaire	4
B-3 - Les algorithmes	4
B-3-1 - Le gradient	4
B-3-2 - La ligne de partage des eaux du gradient	7
B-3-2-1 - Les minima de la fonction gradient	7
B-3-2-2 - Reconstitution des bassins versants	7
B-3-3 - Déségmentation de l'image	10
C/ Filtrage des images	14
II - METALLOGRAPHIE ET MICROFRACTOGRAPHIE DE STRUCTURES MARTENSITIQUES ET BAINITIQUES	16
A/ Contexte et objet de l'étude	16
A-1 - Rappels bibliographiques	17
A-2 - Acier étudié	19
A-2-1 - Observation métallographique des structures et des faciès de rupture	19
B/ Discussion	31
CONCLUSION GENERALE	35
ANNEXE I : Morphologie Mathématique et fonctions	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	37

## STEREOMETRIE DE FACIES DE RUPTURE FRAGILE

### APPLICATION DE LA MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE A L'ANALYSE QUANTITATIVE DE SURFACE NON PLANE

S. BEUCHER & M. BLANC

---

#### Résumé

On présente tout d'abord un certain nombre de méthodes de traitement d'image permettant une exploitation quantitative des variations de niveau de gris d'une image métallographique : calcul du module du gradient de l'intensité lumineuse, techniques de délimitation de contour à partir des extremas locaux du niveau de gris ou de son gradient. Les résultats obtenus et les difficultés liées à l'exploitation de ces méthodes sur le prototype de l'Analyseur de texture sont présentés.

Dans une deuxième partie, les possibilités d'application de ce type de méthode quantitative à l'étude par stéréométrie des faciès de rupture de structures de trempe (martensite et bainite) d'aciers à bas carbone sont discutées d'un point de vue métallurgique. En particulier, la notion de facette de pseudo-clivage, qui a servi de base aux algorithmes de traitement d'image développés, semble inadaptée à décrire la rupture de ce type de structure.

## INTRODUCTION

La stéréoscopie est une technique souvent utilisée pour aider à l'interprétation des images microfractographiques de microscopie électronique à balayage et tirer de leur examen des indications sur le mécanisme de rupture. On se contente généralement d'une analyse qualitative de ces clichés, faisant appel à la capacité du cerveau à restituer le relief stéréoscopique. On conçoit néanmoins l'intérêt qu'il y aurait à posséder parallèlement à cette vision d'ensemble une description quantitative du faciès de rupture (surface totale, désorientations entre facettes, taille des facettes...) que l'on pourrait chercher à corrélérer avec les caractéristiques mécaniques du matériau considéré.

La présente étude constitue la suite d'une recherche menée en ce sens sur l'analyse quantitative de surfaces non planes, entamée lors d'un premier contrat.

Dans l'étude précédente, nous avons décrit le principe d'une analyse quantitative des faciès de rupture fragile des structures ferritiques. Le choix des matériaux et des traitements thermiques réalisés répondait au souci d'évaluer le rôle de la taille des grains et de l'existence d'orientations privilégiées (textures) sur la morphologie du chemin de rupture. Il pourrait résulter en particulier de ce type d'étude une meilleure compréhension des caractéristiques mécaniques des tôles d'aciers obtenues par laminage contrôlé (affinement du grain et apparition d'une texture cristallographique). Deux approches avaient été envisagées pour caractériser la morphologie, finalement assez complexe, des faciès de rupture fragile des ferrites.

La première méthode avait consisté à utiliser les clichés stéréoscopiques de microscopie à balayage pour calculer une carte cotée du faciès de rupture. Si le résultat d'une telle analyse contient -théoriquement- toute l'information disponible sur le faciès de rupture, il est vite apparu que l'exploitation de ces données nécessitait un traitement par ordinateur très complexe (calcul par interpolation des cotes manquantes, délimitation des facettes ...) dépassant largement le cadre de l'étude.

Dans une deuxième approche, nous avons proposé qu'en introduisant une hypothèse morphologique supplémentaire sur les faciès de rupture, à savoir l'existence d'un constituant microstructural bien défini - la facette - il était possible de construire des algorithmes moins complexes et caractérisant précisément ces facettes de clivage. Nous n'avons pu aller plus avant dans le cadre du premier contrat et c'est la description des algorithmes relatifs aux structures à facettes qui fera l'objet de la première partie de ce rapport.

Dans la deuxième partie du rapport, nous décrirons les structures en lattes (martensites, bainites à bas carbure) faisant l'objet de la présente étude. Après avoir présenté les aspects métallurgiques relatifs à l'obtention et aux caractéristiques mécaniques de ces structures, nous discuterons des méthodes propres à décrire leur faciès de rupture fragile. Le problème est en particulier de savoir si la notion de facette, utilisée pour décrire la rupture fragile des ferrites, est extrapolable pour caractériser la rupture par quasi-clivage des structures en lattes.

Nous avons exposé dans le rapport d'avancement de cette étude les problèmes de matériel (principalement de saisie des images et de moyens informatiques) qui perturbaient la bonne exécution de nos algorithmes de traitement d'image. Si ces difficultés ne mettent pas en cause l'intérêt théorique des méthodes proposées, elles montrent que ce type d'étude ne pourra être mené concrètement à bien que lorsque la technologie des analyseurs d'image aura fait des progrès importants tant sur le plan de la qualité de la détection des images que sur celui de la puissance des moyens informatiques mis en oeuvre.

## I - ANALYSE DES IMAGES

### A/ Introduction

Pour la compréhension de cette partie, le lecteur est prié de se reporter au rapport final d'étude concernant la décision d'aide n° 76-7-1209 (référence 6 de la bibliographie).

L'analyse des clichés stéréoscopiques de fractures avait mis en évidence un certain nombre de difficultés liées à l'extrême complexité de ce genre d'images. L'analyse, dans un premier temps, procédait par calcul de décalages de zones homologues sur les deux photographies. Cette méthode fournissait une carte de points cotés. Malheureusement cette carte s'avérait difficile à utiliser car elle ne permettait pas de délimiter efficacement les différentes facettes de clivage de la fracture. On s'était donc orienté sur une méthode entièrement différente basée sur la détection des contours des facettes avant calcul des altitudes. Cette méthode est brièvement exposée dans ( 7 ).

Nous reviendrons plus en détail sur ces procédés. On peut néanmoins déjà constater que bien qu'ils se soient révélés très prometteurs, les résultats obtenus sur des images réelles sont assez décevants. L'analyse des résultats sera également discutée ultérieurement.

### B/ Analyse des clichés. Description détaillée de la méthode.

Nous ne reviendrons pas, dans cette partie, sur les méthodes de calage des images. Le procédé reste celui qui a été décrit précédemment.

#### B-1 - Détection des contours de l'image. Ligne de partage des eaux.

Une image peut être considérée comme une fonction  $f(x)$ , représentant la valeur de gris (ou luminance) en chaque point  $x$ . Un contour dans une image est, en première approximation une zone (un ensemble de points si l'image est numérisée) où la variation de luminance est rapide. Inversement, une facette de clivage est une zone de l'image relativement homogène, à variation de luminance faible. La détection de contours s'effectue en prenant en compte les zones à faible variation de luminance et en délimitant leurs zones d'influence. Ces définitions subjectives sont

formalisées par l'intermédiaire du concept de lignes de partage des eaux d'une fonction. Nous ne reviendrons pas ici sur la définition d'une ligne de partage des eaux d'une fonction. Le lecteur voudra bien se référer à ( 7 ) pour plus ample information. Nous donnerons simplement une description aussi simple que possible des algorithmes, parfois assez complexes, utilisés dans cette étude.

## B-2 - Avertissement préliminaire

Pour la bonne compréhension des algorithmes, quelques points doivent être soulignés.

Les images sont numérisées à l'aide de l'analyseur de texture AT.4 du Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique à Fontainebleau. La numérisation se fait suivant une trame hexagonale et sur 128 niveaux de gris au plus.

L'analyseur de texture permet d'effectuer sur les images les transformations de base de la morphologie mathématique définies pour les ensembles, mais aussi pour les fonctions. Les transformations ensemblistes de base sont succinctement décrites à l'annexe II du Rapport ( 6 ) cité en références. En ce qui concerne les transformations appliquées aux fonctions, on trouvera leur définition à l'annexe I du présent rapport, ainsi qu'un résumé des notations utilisées.

## B-3 - Les algorithmes

### B-3-1 - Le gradient

Considérons une image de fracture (fig. 1 ), et la même image après numérisation et filtrage (fig. 2 ). Les différents filtres utilisés seront décrits par la suite.

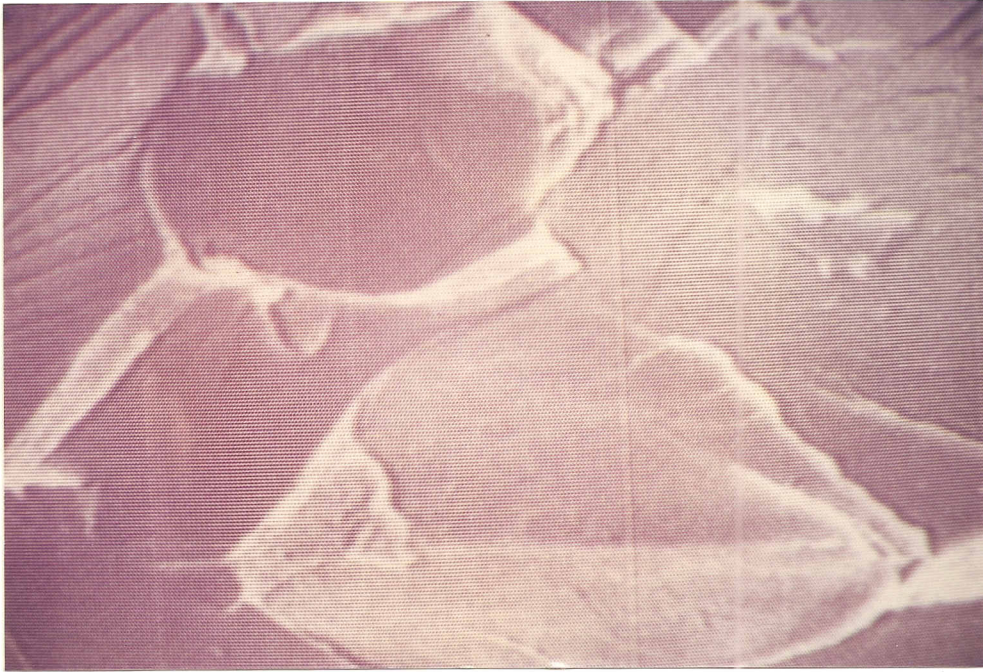


Figure 1 : Image de Fracture au M.E.B.

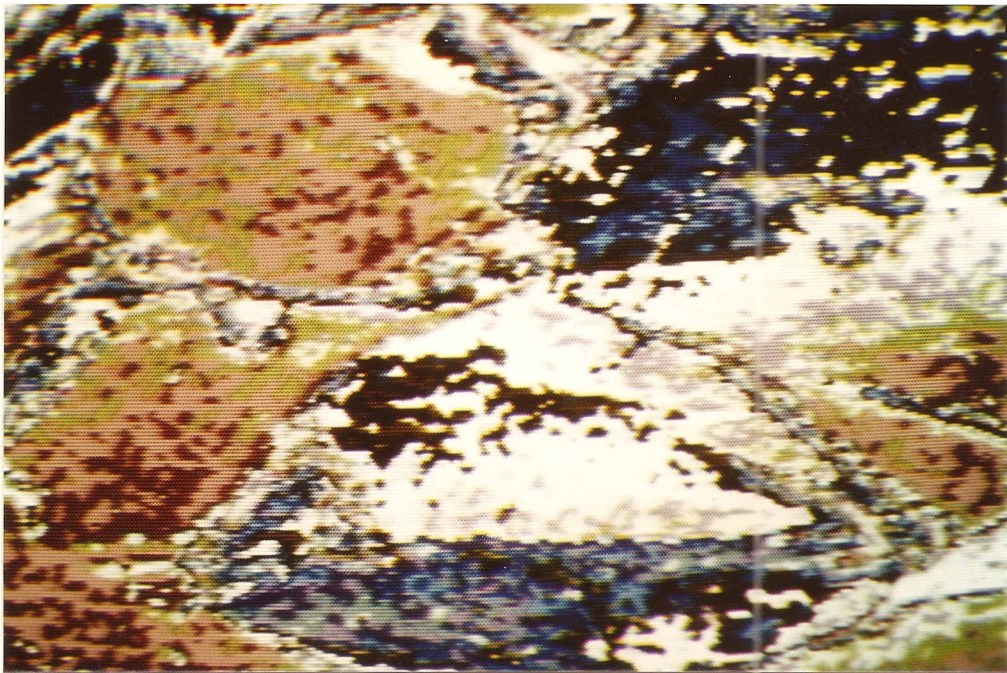


Figure 2 : L'image après numérisation et filtrage.



L'image numérisée s'interprète comme une fonction  $f(x)$  de la luminance en chaque point  $x$ . L'opérateur restituant les variations de luminance de cette image est l'opérateur gradient. Cet opérateur définit un vecteur dont le module prendra en compte les variations de niveau de gris, quelque soit leur direction.

$$|\text{grad } f(x)| = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{au point}$$

$x = (x_1, x_2)$  du plan image.

Le gradient de  $f$  peut aussi se définir par :

$$|\vec{\text{grad}} f| = \frac{(f \oplus H) - (f \ominus H)}{2}$$

$f \oplus H$  et  $f \ominus H$  étant respectivement les dilaté et érodé de la fonction  $f$  par un hexagone élémentaire  $H$  (Voir Annexe 1).

La figure ( 3 ) illustre l'utilisation de cet algorithme de détection des gradients.

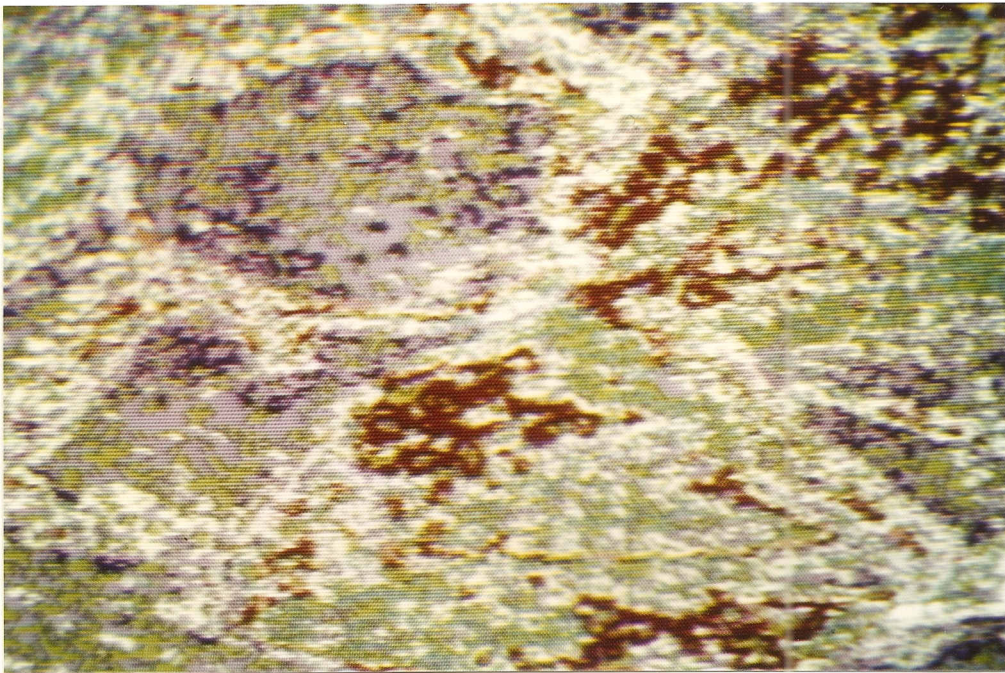


Figure 3 : Gradient de l'image numérisée.

Un seuillage de la fonction gradient permet, par calcul de corrélation des gradients des deux images, de caler la paire stéréoscopique, comme il a été indiqué dans ( 6 ).

B-3-2 - La ligne de partage des eaux du gradient.

La ligne de partage des eaux du gradient nécessite l'utilisation de deux outils morphologiques : d'une part, la détection des minima de gradient et d'autre part la reconstitution des bassins versants de ces minima (pour une définition plus précise de ces termes, voir l'annexe I). De plus, de par sa définition même la ligne de partage des eaux implique les seuils successifs de la fonction gradient.

B-3-2-1 - Les minima de la fonction gradient.

On posera  $g = |\vec{g}rad f|$ . Les minima sont obtenus par la transformation :

$$h = (g \ominus \{H\}, g-1) - (g-1)$$

$(g \ominus \{H\}, g-1)$  étant l'érosion de la fonction  $g$  à l'extérieur (ou conditionnellement à) de  $g-1$ . Cette transformation fournit les minima de  $g$ . La fonction  $h$  obtenue est une fonction en tout ou rien : c'est l'indicatrice de l'ensemble des minima de  $g$ .

B-3-2-2 - Reconstitution des bassins versants.

Partant des minima, il est alors possible de restituer les bassins versants. Les bassins versants sont les zones d'influence de ces minima. Les minima constituent en quelque sorte des marqueurs des facettes (zone à gradient faible, puisque la luminance est à peu près constante). La zone d'influence d'un minima est constituée des points du graphe de  $g$ , tels qu'il existe une ligne de plus grande pente monotone (c'est-à-dire toujours descendante ou montante) liant ces points et le minimum.

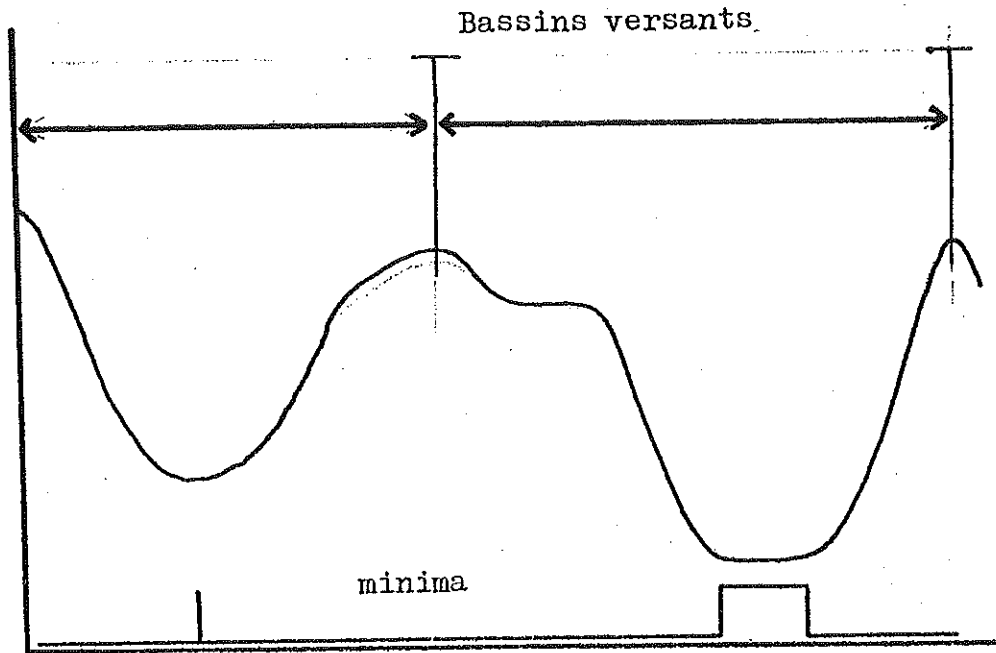


Figure 4 : Minima et bassins versants d'une fonction

En pratique, la fonction  $g$  est découpée en ses différents seuils. Les bassins versants sont obtenus en construisant le squelette par zone d'influence ( 8 ) des minima à l'intérieur des seuils successifs. Cette procédure itérative laisse des points qui ne sont jamais atteints.

Ces points génèrent des lignes fermées : ce sont les lignes de partage des eaux. Ces lignes de partage des eaux devraient correspondre aux contours des composants topographiques (facettes...) présents dans le faciès de rupture, fig. ( 5 ).

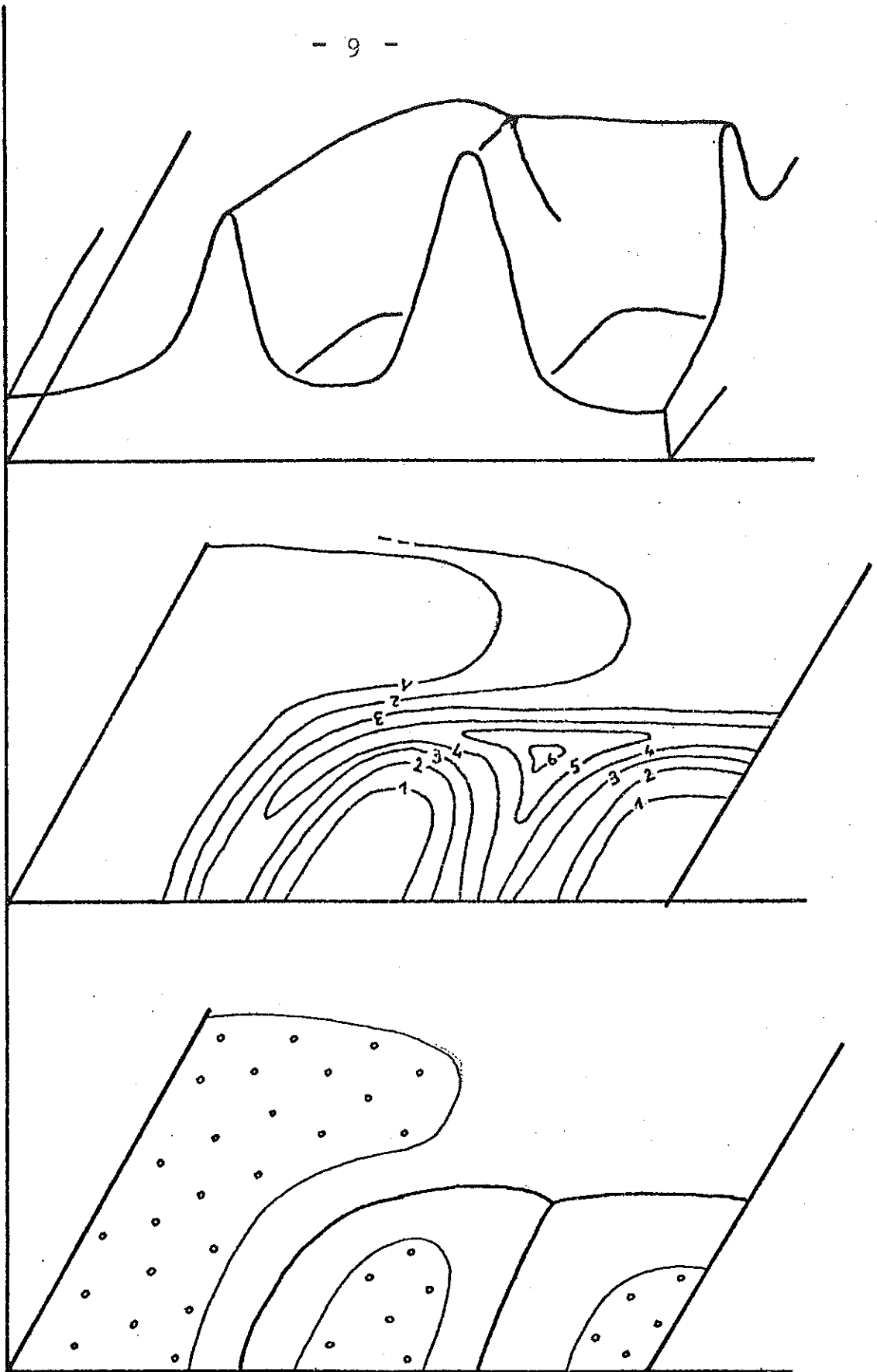


Figure 5 : Reconstitution des bassins versants d'une fonction.

La figure ( 6 ) illustre le résultat d'un tel algorithme sur une image réelle de fracture.

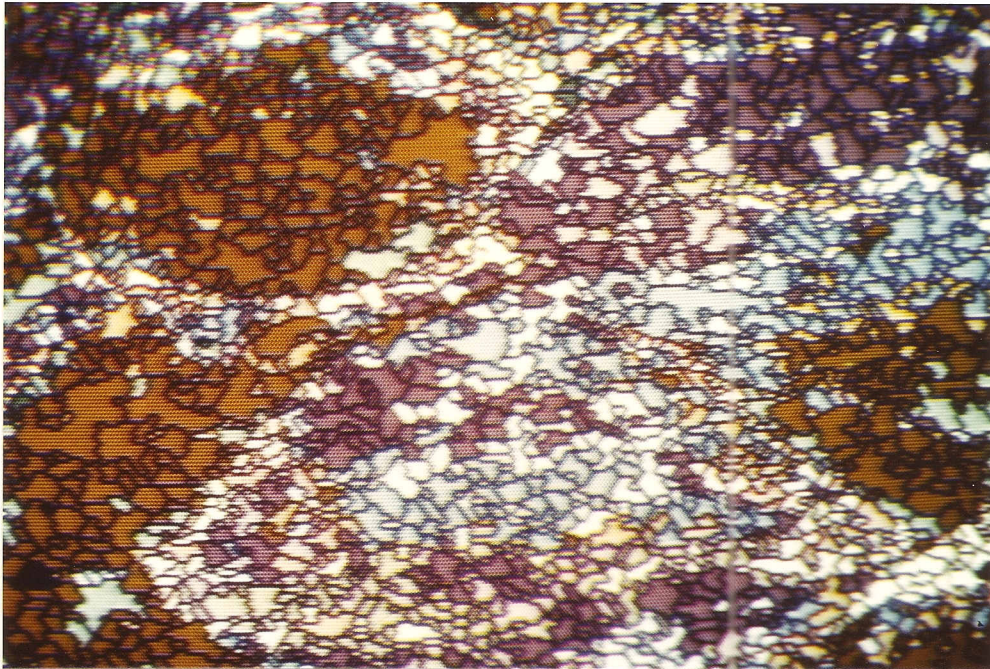


Figure 6 : Bassins versants de l'image numérisée.

A l'évidence, l'image obtenue est très sursegmentée. En fait cette sursegmentation est en partie normale. En effet, il peut exister dans une zone apparaissant homogène à l'oeil des variations de teinte de gris suffisantes pour générer des sauts, donc des contours. Mais inversement, cette procédure nous assure que tous les contours "visibles" seront présents dans l'image finale. Il est donc nécessaire à ce stade de filtrer les contours obtenus.

### B-3-3 - Désegmentation de l'image.

Les lignes de partage des eaux constituent un ensemble. Mais il est possible également de définir la ligne de partage des eaux comme une fonction, dont le support serait l'ensemble "ligne de partage des eaux". Explicitons cette définition. Considérons la figure ( 7 ). Une fonction de luminance (mono-dimensionnelle pour la clarté de l'exposé) est représentée

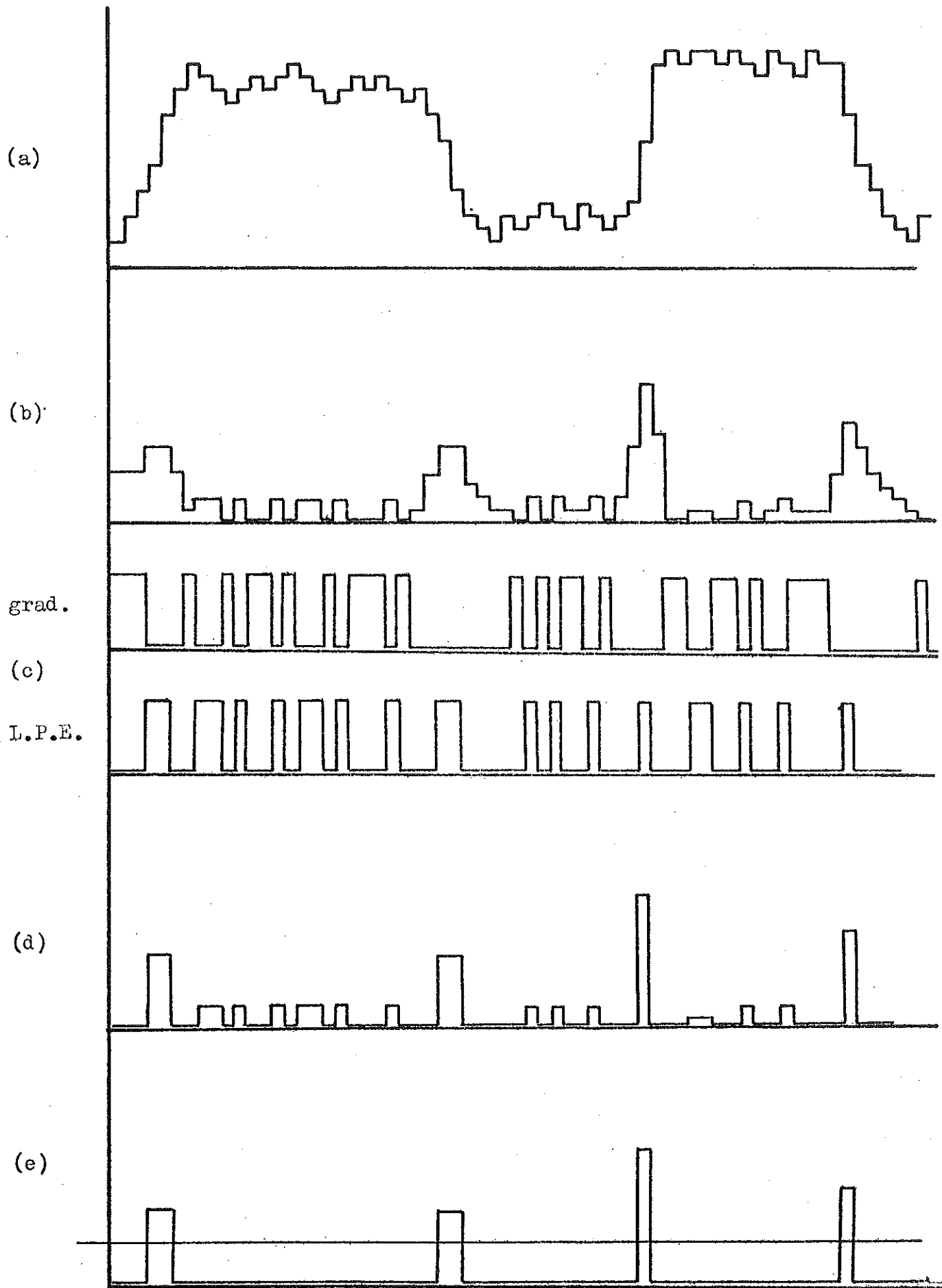


Figure 7 : Principe de la déségmentation.

(figure 7 -a) ainsi que son module du gradient (figure 7-b).

La figure c représente les fonctions indicatrices des minima de gradient d'une part, de la ligne de partage des eaux d'autre part. On constate que la ligne de partage des eaux segmente bien les zones homogènes de la fonction de luminance. Mais ces lignes ne sont pas toutes équivalentes : certaines définissent des contours plus marqués, d'autres segmentent des zones de gris à peu près homogènes.

On peut alors définir une fonction ligne de partage des eaux. Si  $k_{LPE}(x)$  désigne l'indicatrice de l'ensemble, et  $g$  la fonction gradient, on écrira :

$$f_{LPE} = g \cdot k_{LPE} \quad /1/$$

Cette fonction est représentée figure 7 -d. Cette ligne de partage des eaux est donc d'autant plus importante que le saut de luminance est élevé. Il est alors possible d'éliminer les contours peu visibles. Il suffit de seuiller la fonction  $f_{LPE}$  (figure 7 -e).

Dans le cas d'une image bidimensionnelle cette méthode de segmentation se complique quelque peu car les lignes de partage ne sont plus des "points" mais des éléments d'arcs. On peut là encore définir une fonction  $f_{LPE}$  par la relation /1/ mais les critères d'éliminations des éléments d'arcs non désirés sont plus nombreux. On ne les décrira pas tous d'autant que tous n'ont pas été testés, faute de temps (moyens informatiques). Donnons simplement un exemple ; un des critères peut être le suivant (ce n'est pas le meilleur, d'après les résultats) : figure ( 8 ).

Soit un élément d'arc de la LPE. On peut détecter la plus faible valeur prise par la fonction  $f_{LPE}$  sur cet élément d'arc. Si cette valeur est inférieure à une valeur donnée, on supprimera l'élément d'arc de la LPE. La figure ( 9 ) illustre ce procédé sur une image réelle.

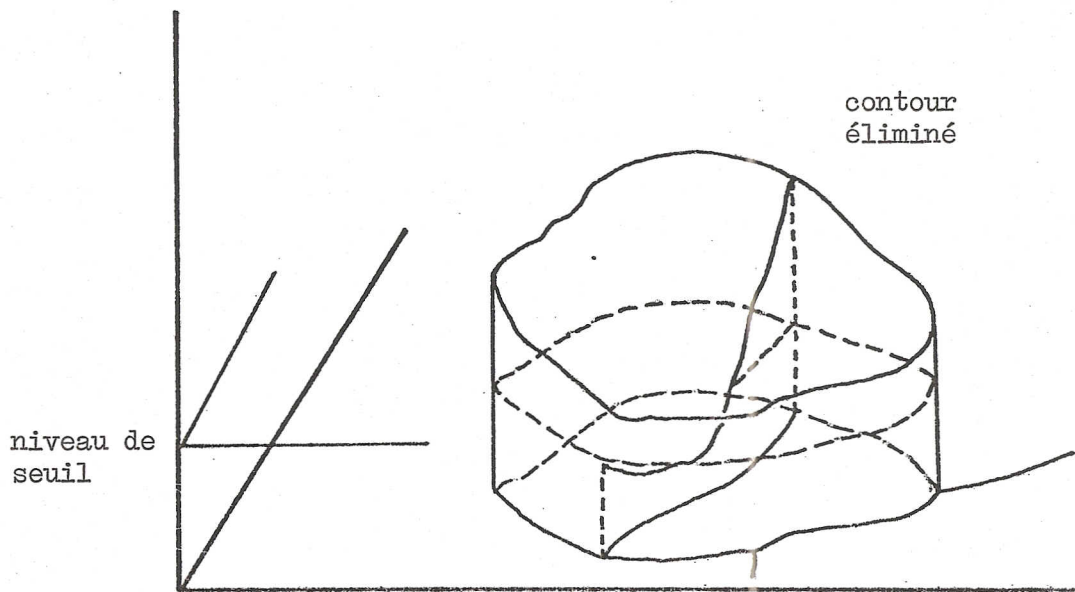


Figure 8 : Désegmentation d'une image bidimensionnelle.

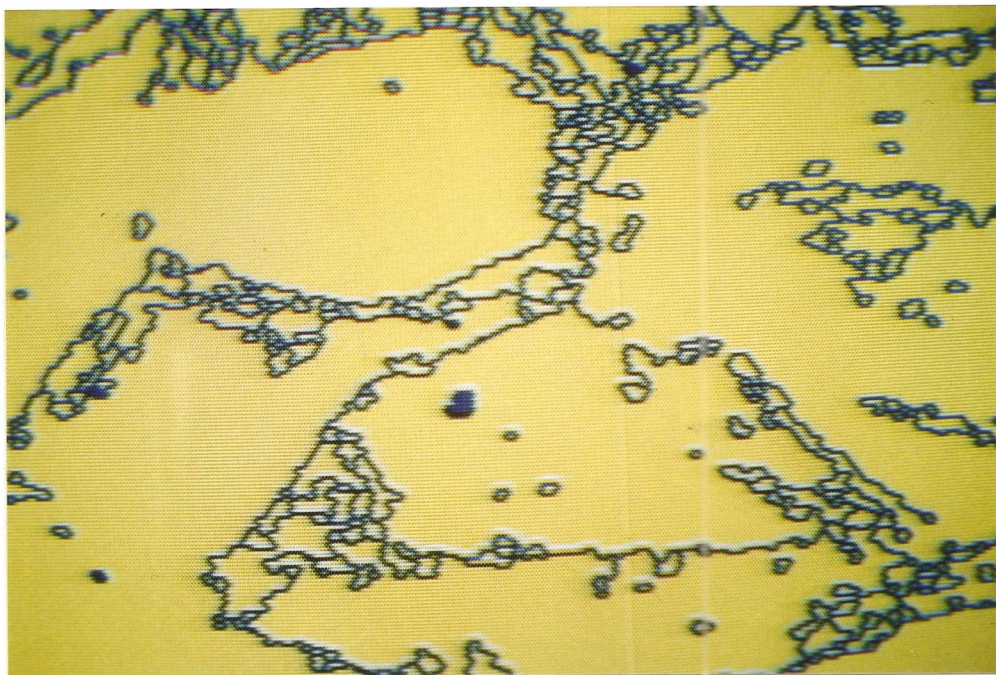


Figure 9 : Résultat obtenu sur l'image numérisée.



La déségmentation des images apparaît trop poussée: Ceci demande quelques explications . En premier lieu, l'algorithme de déségmentation utilisé n'est pas très élaboré. D'autres algorithmes existent, mais il n'ont pas été testés, car ils sont fort longs. (le temps moyen de traitement d'une image par paire stéréoscopique est déjà de 1 h.). Une autre cause de mauvais résultats tient à la technologie utilisée pour stocker l'information : On a, en effet, utilisé des disques souples ("floppy"). L'obligation que l'on a de rappeler très souvent l'information stockée sur ces disques fait que l'on multiplie le nombre de points erronés dans une proportion qui est loin d'être négligeable (Il y a en moyenne 1000 appels disques par traitement. Le pourcentage d'erreurs par appel est d'environ 0,01 %. La proportion de points faux en fin de traitement est donc de 10 %, ce qui est énorme).

Toutes ces raisons, et quelques autres, font que l'on n'a pas poursuivi le traitement plus avant (Repérage des facettes homologues sur les deux photographies et calcul des décalages afin de déterminer le relief). Il est en effet illusoire d'espérer obtenir des résultats satisfaisants sans une technologie adaptée à ce type d'images (c'est-à-dire mémoires numériques, capteurs fiables et sensibles, processeurs rapides de traitement, etc...).

### C/ Filtrage des images

La segmentation introduite par la LPE est dûe, on l'a vu, à de légères variations de niveaux de gris dans les zones "homogènes à l'oeil" de l'image. Ce n'est pas la seule cause. Elle provient aussi d'erreurs de l'algorithme de gradient. Ces "erreurs" sont dûes au caractère localement irrégulier de la fonction de luminance : En effet, le bruit électronique (caméra, etc...) n'est pas négligeable. Ceci nous a conduit à filtrer les images numérisées, avant traitement. Divers filtrages non linéaires ont été pratiqués : Filtrage par la médiane, filtrage par ouverture/fermeture etc... De tous ces essais, il ressort que si ces filtrages apparaissent satisfaisants à l'oeil (aspect lissé de l'image), ils ne réduisent pas sensiblement les erreurs, car ils

ne sont pas adaptés à l'opérateur gradient. Ces filtrages peuvent être itérés, mais ils ne convergent pas forcément vers un résultat stable. D'autres procédés, convergents, ont été élaborés, mais leur efficacité n'a pu être analysée en détail.

II - METALLOGRAPHIE ET MICROFRACTOGRAPHIE DE STRUCTURES  
MARTENSITIQUES ET BAINITIQUES D'ACIERS A BAS CARBONE

A/ CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

Les études relatives aux structures ferrite-perlite des aciers de construction soudables, obtenues notamment après laminage contrôlé, ont montré l'intérêt d'un abaissement des teneurs en carbone et laissé entrevoir les limites des progrès réalisables par l'affinement du grain ou par durcissement par précipitation d'éléments de microalliage tels Nb, B, Ti...

Pour franchir un nouveau pas dans la recherche de caractéristiques mécaniques intéressantes, en particulier d'une limite d'élasticité élevée et d'une bonne résistance à la rupture fragile, il faut envisager des structures de trempe revenues. La trempabilité généralement réduite des aciers à basse teneur en carbone conduit à considérer des nuances suffisamment alliées pour permettre l'obtention de structures de trempe (martensite et bainite) en refroidissement continu sur une large plage de vitesse de refroidissement.

Dans ce contexte, de nombreux travaux ont été consacrés depuis quelques années à l'étude des relations structure - propriétés et des compromis limite d'élasticité-ténacité permis par des structures bainitiques, intermédiaires entre les ferrite-perlite et les martensites. En particulier, des corrélations entre la taille des facettes de pseudo-clivage des faciès de rupture et la ténacité ont été relevées.

Le programme de recherche proposé répondait donc à l'idée qu'une analyse quantitative des faciès de rupture de ce type de structure pouvait permettre une meilleure compréhension des caractéristiques mécaniques et du mode de rupture dans ces aciers.

#### A-1 - Rappels bibliographiques

Les morphologies en lattes, caractéristiques des structures de trempe sévère des aciers à bas carbone, se présentent comme la juxtaposition au sein du grain austénitique de départ de quelques paquets de longues lattes parallèles de ferrite généralement faiblement désorientées entre elles. Le paquet de lattes est en réalité associé à un plan d'accolement (111) de l'austénite mère (1) : Il y a donc six orientations de lattes de type KURJUMOV-SACHS possibles par paquet. S'il est généralement admis que l'affinement de la microstructure se traduit à la fois par une limite élastique plus élevée et une meilleure ténacité, l'influence exacte des différents paramètres microstructuraux sur la résistance à la rupture fragile des structures en lattes et sur leur limite d'élasticité a été largement discutée (2-5). Elle a d'abord été reliée à la taille du grain austénitique, puis à celle du paquet. Les études de OHTANI et COLL (3), ainsi que celles de ROBERTS (4), NAYLOR et KRAHE (2,5) ont montré que la taille de la facette de pseudo-clivage correspond à celle du paquet martensitique ou bainitique, c'est-à-dire que les déviations majeures de la fissure de clivage ne se produisent qu'aux joints de paquets. D'après l'analyse des orientations cristallographiques au sein du paquet, d'autres auteurs attribuent à certains sous-paquets constitués de la juxtaposition de plaquettes le rôle de grain efficace pour le contrôle de la propagation de la rupture fragile. Quoiqu'il en soit, la taille moyenne de ces "grains efficaces" est le plus souvent indirectement liée à celle du grain austénitique initial bien que la résistance à la rupture fragile semble dépendre également de la taille des lattes.

La disparité des résultats et relations rendant compte de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture fragile des structures en lattes des aciers à bas carbone s'explique en bonne partie par l'importance de paramètres microstructuraux difficiles à préciser de manière quantitative : distribution des dislocations (densité et sous-joints), sursaturation en carbone et azote de la ferrite, morphologie et précipitation de la cémentite, répartition de l'austénite résiduelle, histogramme des tailles de paquets de lattes, morphologie des faciès de rupture, etc...

En ce qui concerne ce dernier point, l'examen des faciès de rupture en microscopie à balayage a conduit des auteurs japonais à des conclusions intéressantes (3). Pour des cassures réalisées dans le domaine fragile ou même partiellement fragile, ils ont pu définir des facettes de pseudo-clivage, dont la taille est de l'ordre de celle des paquets de lattes, et qui représentent les constituants élémentaires du chemin de fissuration ("unit crack path") ; une diminution des dimensions de ces facettes correspond en particulier à un abaissement de la température de transition de résilience du matériau. On pouvait donc penser d'après ces indications qu'en utilisant l'information supplémentaire sur le relief contenue dans les paires stéréoscopiques MEB il était possible de délimiter automatiquement ces facettes, le fait d'obtenir simultanément leur orientation (paramètre difficile à obtenir avec un stéréocomparateur) conduisant à une caractérisation plus complète du chemin de rupture.

## A - 2 - Acier étudié

La composition et les différents traitements thermiques envisagés pour l'acier étudié figurent au tableau 1. La présence de 2 % de nickel et de 0.5 % de molybdène confère à cette nuance une bonne trempabilité et permet l'obtention de structures de trempe (martensite, bainite en latte ou granulaire) sur la plage étendue de vitesses de refroidissement envisagées ( $\Delta T$   $\frac{700}{300}$  allant de 3 à 400 s.). De plus afin d'évaluer l'effet d'une croissance du grain austénitique, deux températures d'austénitisation (30 minutes à 900 ou 1100° C.) ont été retenues.

Les principales caractéristiques mécaniques de cet acier, considéré pour les quatre traitements envisagés à l'état brut de trempe, sont regroupés au tableau 1. Les courbes de transition de résilience et de cristallinité sont reportées à la figure 10. Pour les faciès de rupture destinés à l'examen stéréoscopique, des éprouvettes complémentaires ont été rompues au palier fragile à - 196° C.

### A-2-1 - Observation métallographique des structures et des faciès de rupture.

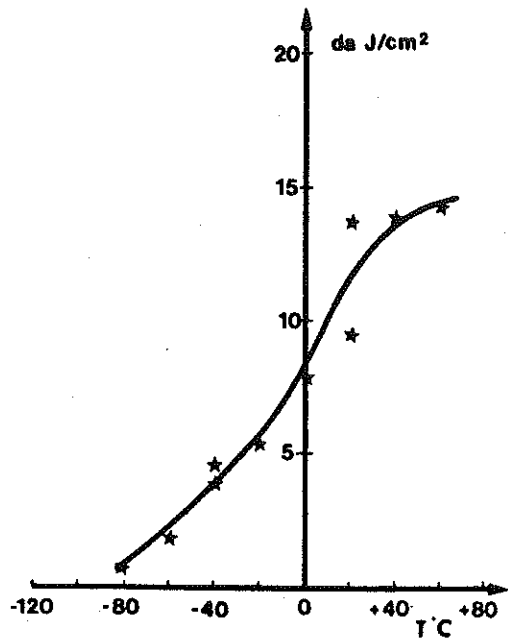
Les micrographies optiques ou de microscopie électronique rassemblées aux planches I à III illustrent les différentes structures métallographiques obtenues. Les faciès de rupture fragile correspondants figurent à la planche IV. Les paires stéréoscopiques (planches V à VIII) permettent de mieux comprendre la morphologie de ces cassures. Dans tous les cas, leur faciès de rupture apparaît complexe, mais on peut faire les observations suivantes :

Traitement thermique						
Température d'austénitisation	Trempe	HV	Re N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A %	Z %
1100°	eau : $\Delta t \frac{700}{300} = 3s$	370	860	1120		
900°	eau : $\Delta t \frac{700}{300} = 3s$	370	855	1110	19	76
900°	huile : $\Delta t \frac{700}{300} = 22s$	275	620	815	22	77
900°	air : $\Delta t \frac{700}{300} = 500s$	225	490	680	27	72

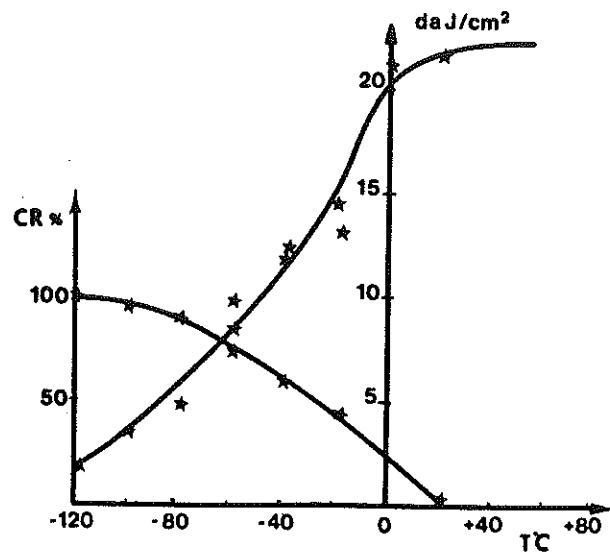
Composition (%) :

C = 0,067  
Mn = 1,37  
Ni = 2,0  
Mo = 0,51  
Al = 0,027  
N<sub>2</sub> = 0,011.

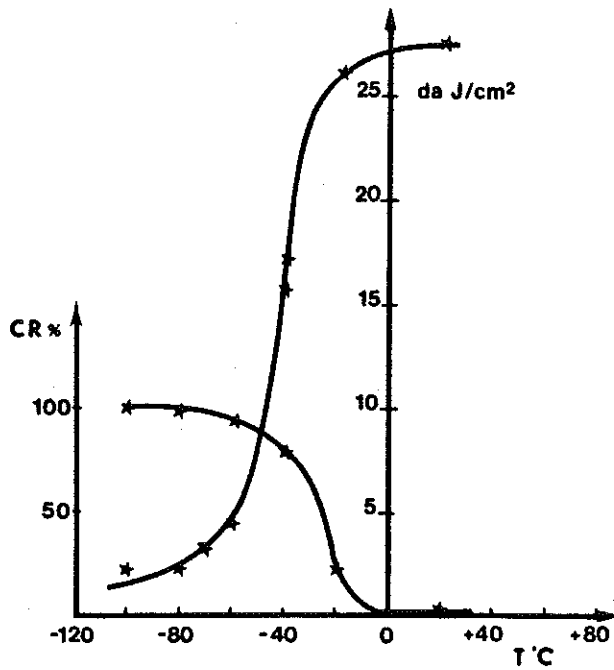
Tableau 1 : Nature et caractéristiques de l'acier étudié



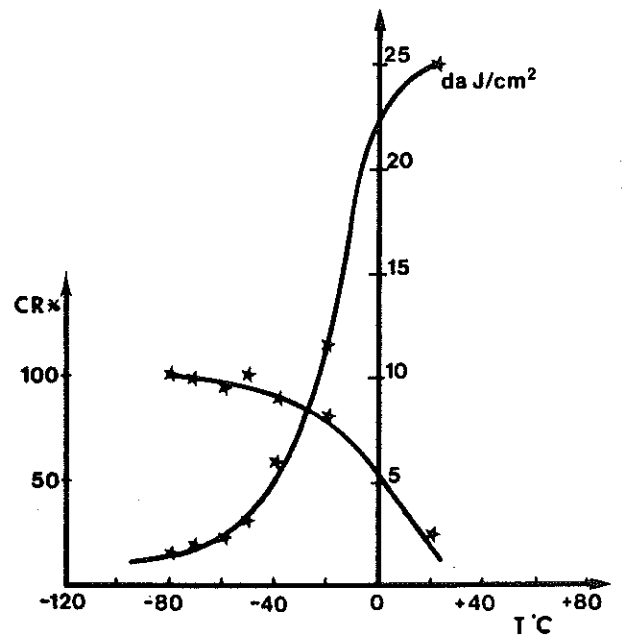
$\theta_\gamma = 1100^\circ\text{C}$  - trempe eau



$\theta_\gamma = 900^\circ\text{C}$  - trempe eau



$\theta_\gamma = 900^\circ\text{C}$  - trempe huile



$\theta_\gamma = 900^\circ\text{C}$  - trempe air

Figure 10 : Courbes de transition de résilience

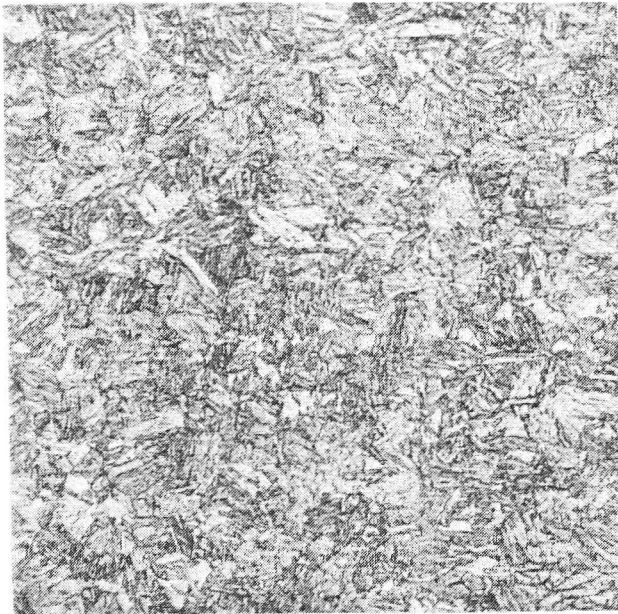




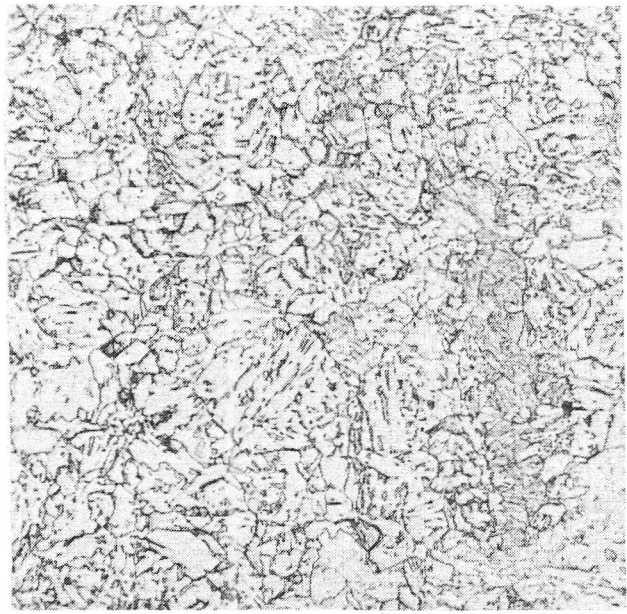
Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 1100^{\circ} \text{C}$  - trempe eau



Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe eau

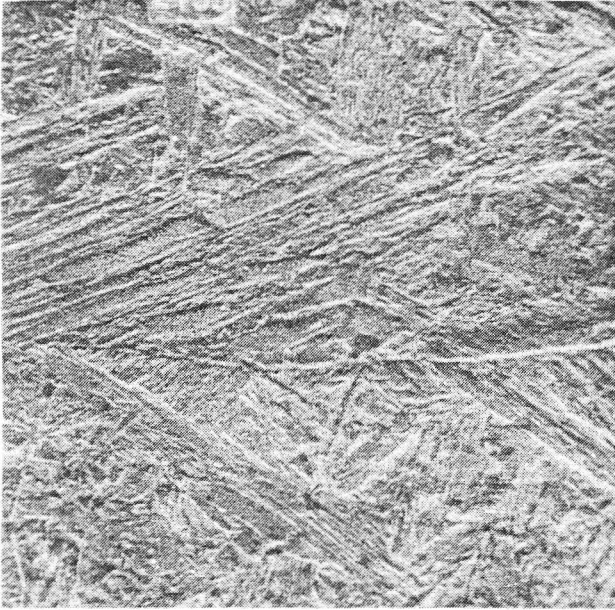


Bainite en lattes  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe huile

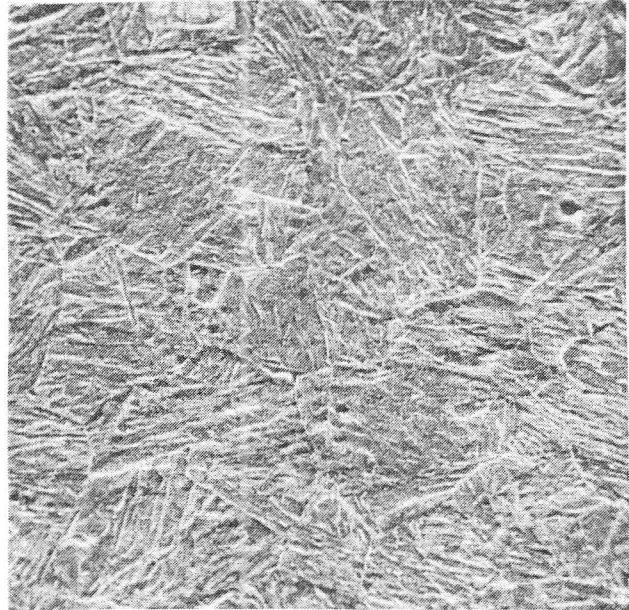


Bainite granulaire  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe air

Planche I. : Micrographies optiques x 520  
Attaque : Réactif de Bechet-Beaujard + 1 % HCl



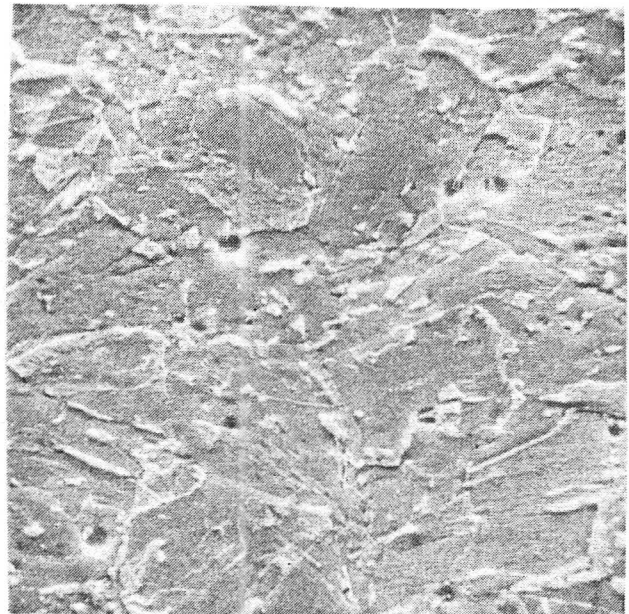
Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 1100^{\circ} \text{C}$  - trempe eau



Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe eau

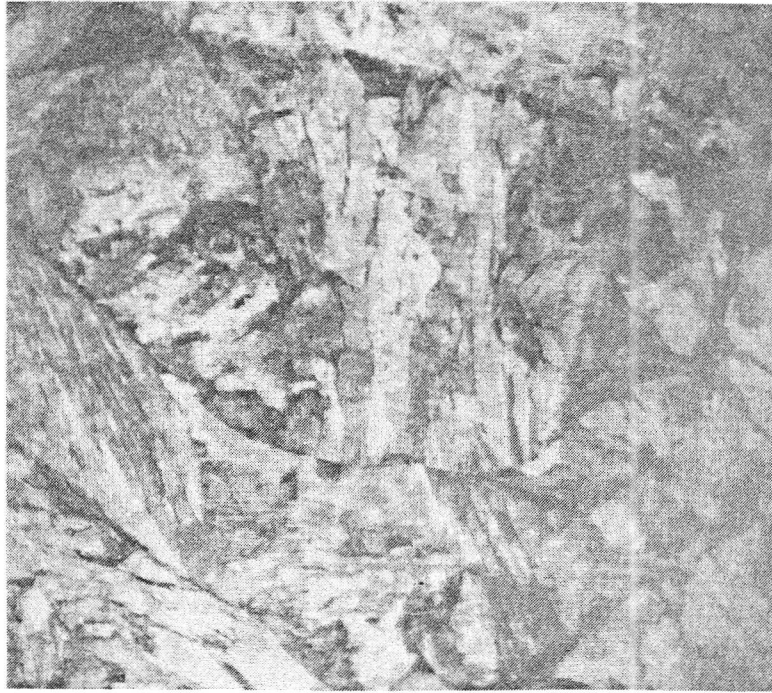


Bainite en lattes  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe huile

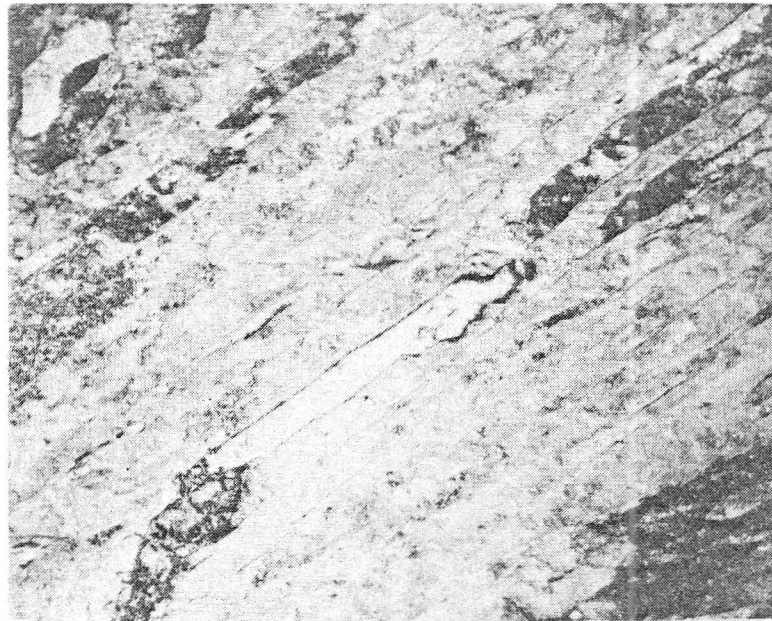


Bainite granulaire  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{C}$  - trempe air

Planche II. : Micrographies électroniques à balayage x 1500  
Coupes polies - Attaque : réactif de Béchet - Beaujard + bisulfite



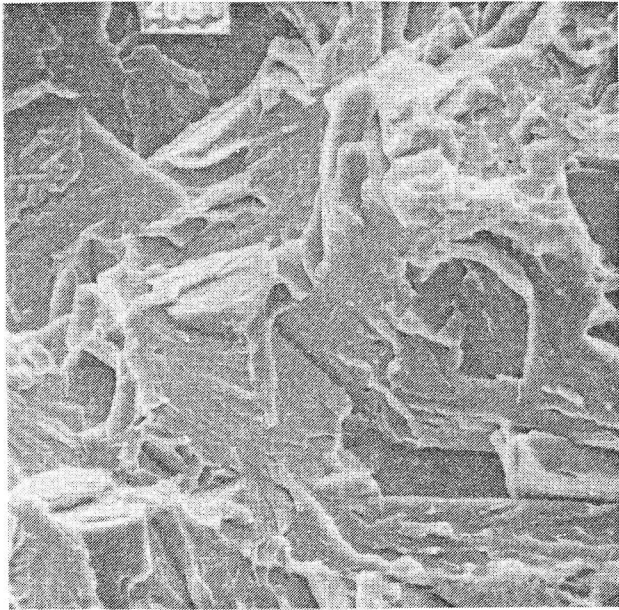
5400 X ( $\theta_{\gamma} = 900^{\circ}$  C)



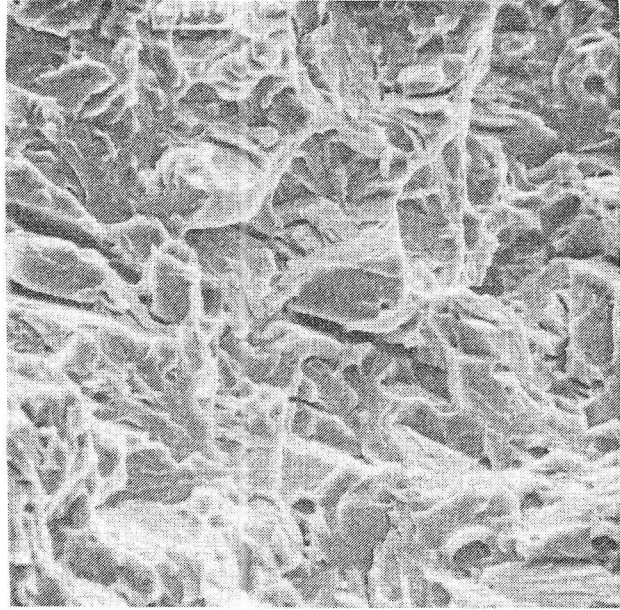
10000 X ( $\theta_{\gamma} = 1100^{\circ}$  C)

Micrographies électroniques en transmission

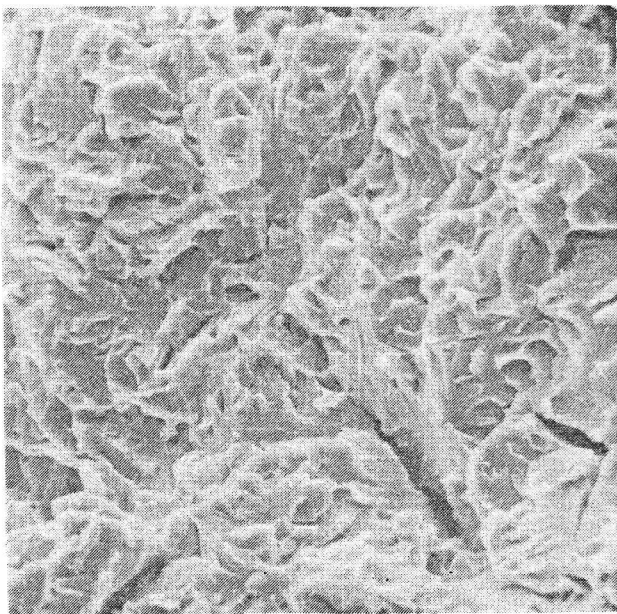
Planche III. : Bainite en lattes



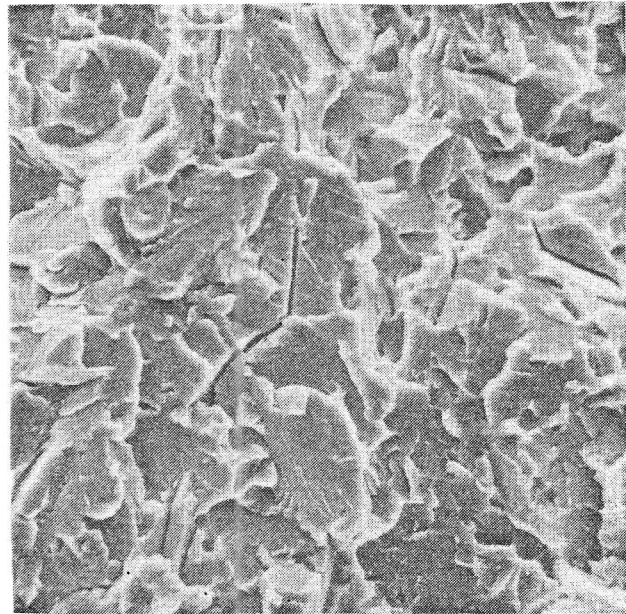
Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 1100^{\circ} \text{ C} - \text{trempe eau}$



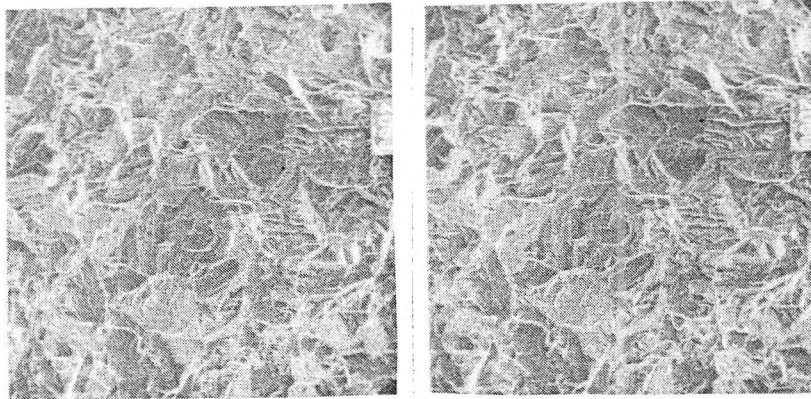
Martensite  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{ C} - \text{trempe eau}$



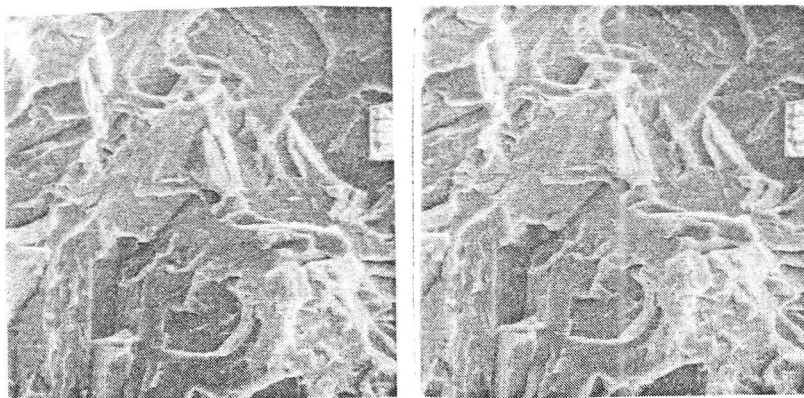
Bainite en lattes  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{ C} - \text{trempe huile}$



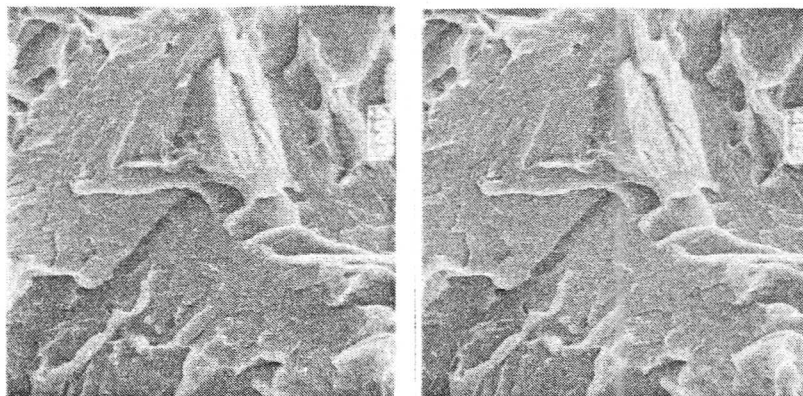
Bainite granulaire  
 $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{ C} - \text{trempe air}$



x 400



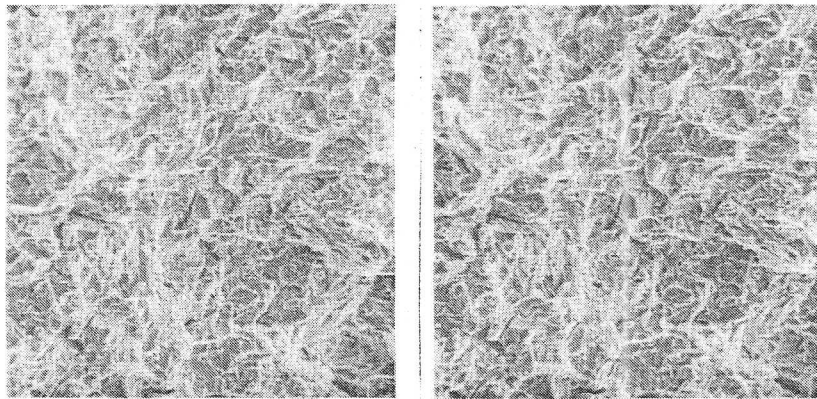
x 1000



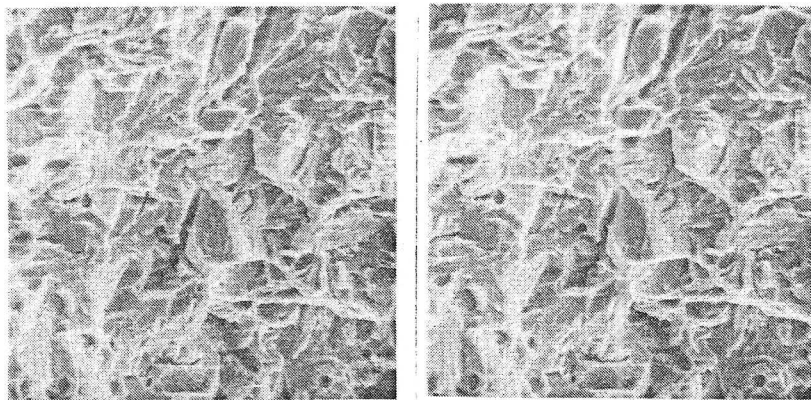
x 2000

Clichés stéréoscopiques MEB

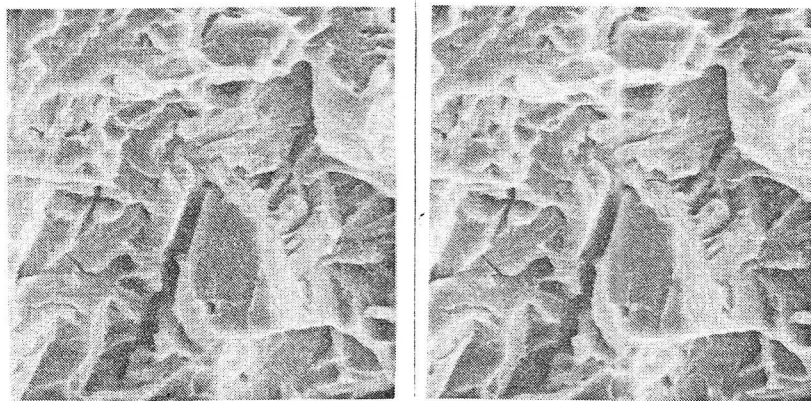
Planche V. : Martensite - Austénitisation à 1100° C, trempe eau  
Rupture par choc à - 196° C



x 400



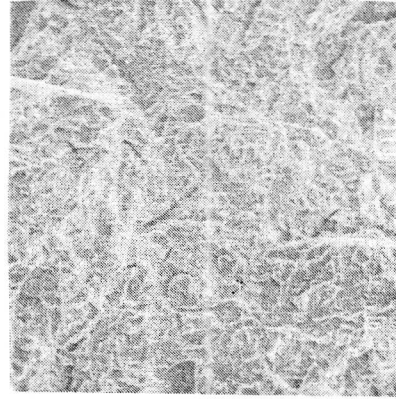
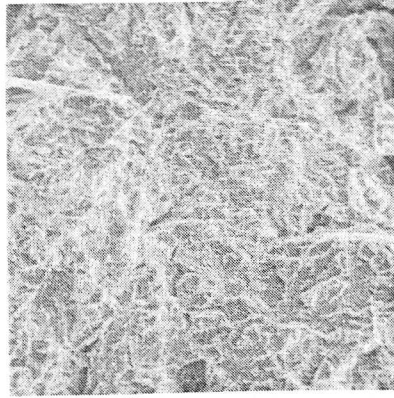
x 1000



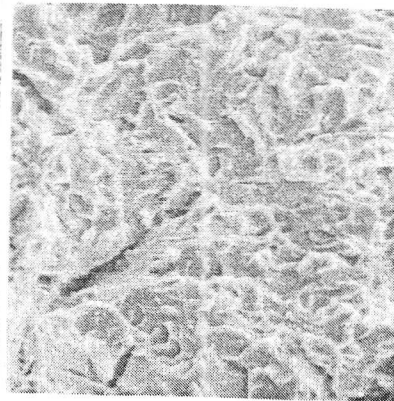
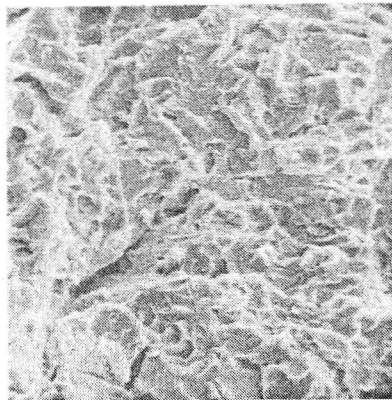
x 2000

Clichés stéréoscopiques MEB

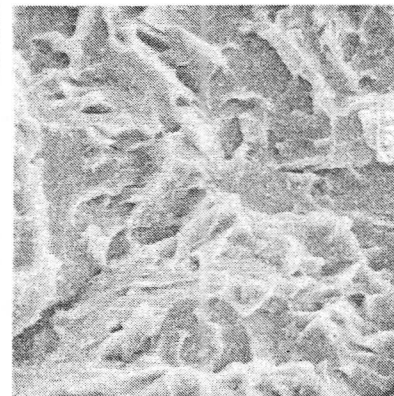
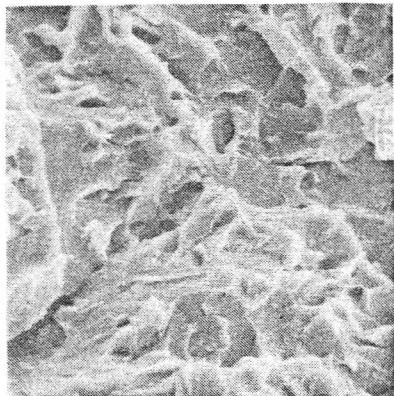
Planche VI. : Martensite - Austénitisation à 900° C, trempe eau  
Rupture par choc à - 196° C



x 400



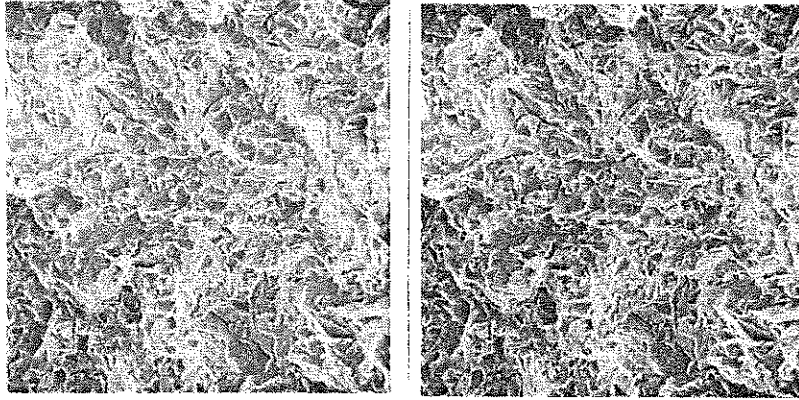
x 1000



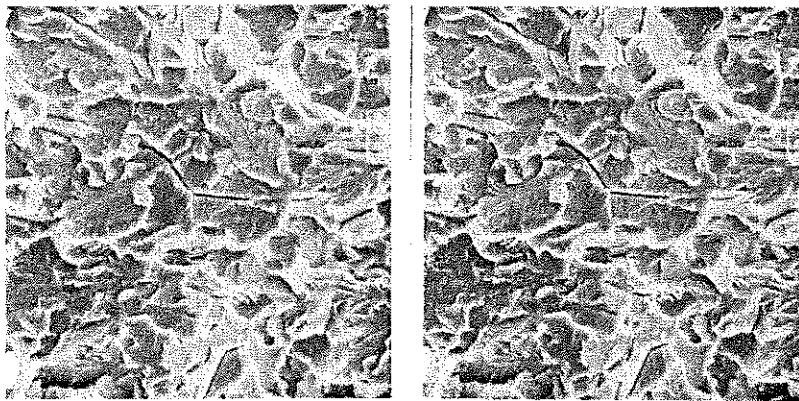
x 2000

Clichés stéréoscopiques MEB

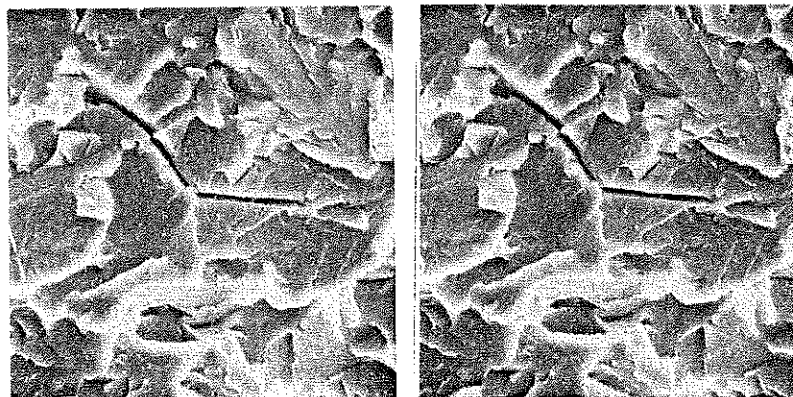
Planche VII. : Bainite en lattes - Austénitisation à 900° C, trempe huile  
Rupture par choc à - 196° C



x 400



x 1000



x 2000

Clichés stéréoscopiques MEB

Planche VIII.: Bainite granulaire - Austénitisation à 900° C, trempe air  
Rupture par choc à - 196° C



a) Martensites

Les deux structures martensitiques obtenues respectivement après austénitisation à 900° et 1100° puis trempe à l'eau sont formées de lattes parallèles de quelques dizaines de microns de large , allongées dans une même direction à l'intérieur d'un même paquet. Bien qu'un grain austénitique puisse donner lieu à plusieurs paquets de lattes (correspondant aux relations d'orientation de KURJUMOV-SACHS), on note une corrélation entre la taille du grain austénitique, très différente dans les deux cas, et celle des paquets de lattes. Cet effet de taille se retrouve également au niveau des faciès de rupture (planche IV). L'aspect global géométrique et polygonal du chemin de fissuration permet d'affirmer le caractère cristallographique (associé au pseudo-clivage) de la rupture. Cependant, les réamorçages de la fissure et les changements de plan sont nombreux.

b) Bainites

Le faciès de rupture de la structure en lattes bainitique est plus complexe que celui des martensites. Il montre par endroits de petites décohésions ductiles : il semble donc que la rupture procède par amorçage fragile suivit d'une fin de rupture très localement ductile.

Enfin le faciès de rupture de la bainite granulaire se rapproche, en plus tourmenté, de celui d'une ferrite avec présence de facettes de clivage et de rivières.

## B/ DISCUSSION

L'algorithme de reconstruction des facettes que nous avons mis au point s'applique séparément à chacune des deux images constituant la paire stéréoscopique. A ce niveau du traitement morphologique, la notion de facette correspond donc simplement à une partition du plan de la photo basée uniquement sur les variations du niveau de gris et pour le calcul de laquelle l'information sur le relief contenue dans la paire stéréoscopique n'est pas utilisée. Ce n'est qu'ensuite, par comparaison des facettes homologues de la paire stéréoscopique, que le relief pourrait être reconstitué. Sans considérer les difficultés liées à l'appareillage utilisé, il se pose donc le problème de savoir si la notion de facette, au sens restrictif qui vient d'être indiqué, convient à décrire les structures observées. Les planches IV à VIII montrent que la réponse est négative du fait de la diversité des constituants topographiques pouvant donner lieu à un contraste en microscopie électronique à balayage. Ainsi, l'examen de la quarantaine de paires stéréoscopiques réalisées sur ces faciès nous a montré qu'une zone telle que celle représentée en figure 1, où l'on distingue quelques facettes bien délimitées, constitue l'exception plutôt que la règle générale. Dans la perspective d'une analyse quantitative des faciès de rupture, il apparaît donc nécessaire de prendre en compte dès le début du traitement algorithmique l'information sur le relief contenue dans la paire stéréoscopique, afin d'en obtenir la carte cotée.

En ce qui concerne les relations structure-propriétés dans ces aciers, les valeurs regroupées au tableau 2 confirment un certain nombre de résultats classiques. En particulier, les tailles moyennes des paquets de lattes et des facettes de pseudo-clivage sont voisines et dépendent de la taille du grain

Traitement thermique	Taille de grain $\gamma$		Largeur des paquets de lattes ( $\mu\text{m}$ )	diamètre des facettes de pseudo clivage ( $\mu\text{m}$ )	TK <sub>100 J</sub> (° C)
	norme 04-102	diamètre ( $\mu\text{m}$ )			
$\theta_{\gamma} = 1100^{\circ}\text{C}$ trempe eau	4	$\sim 80$	$\sim 50$	$\sim 50$	0
$\theta_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ trempe eau	8 - 9	$\sim 15$	$\sim 15$	$\sim 15$	- 40
$\theta_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ trempe huile	8 - 9	$\sim 15$	$\sim 15$	$\sim 15$	- 40
$\theta_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ trempe air	8 - 9	$\sim 15$	-	$\sim 20$	- 20

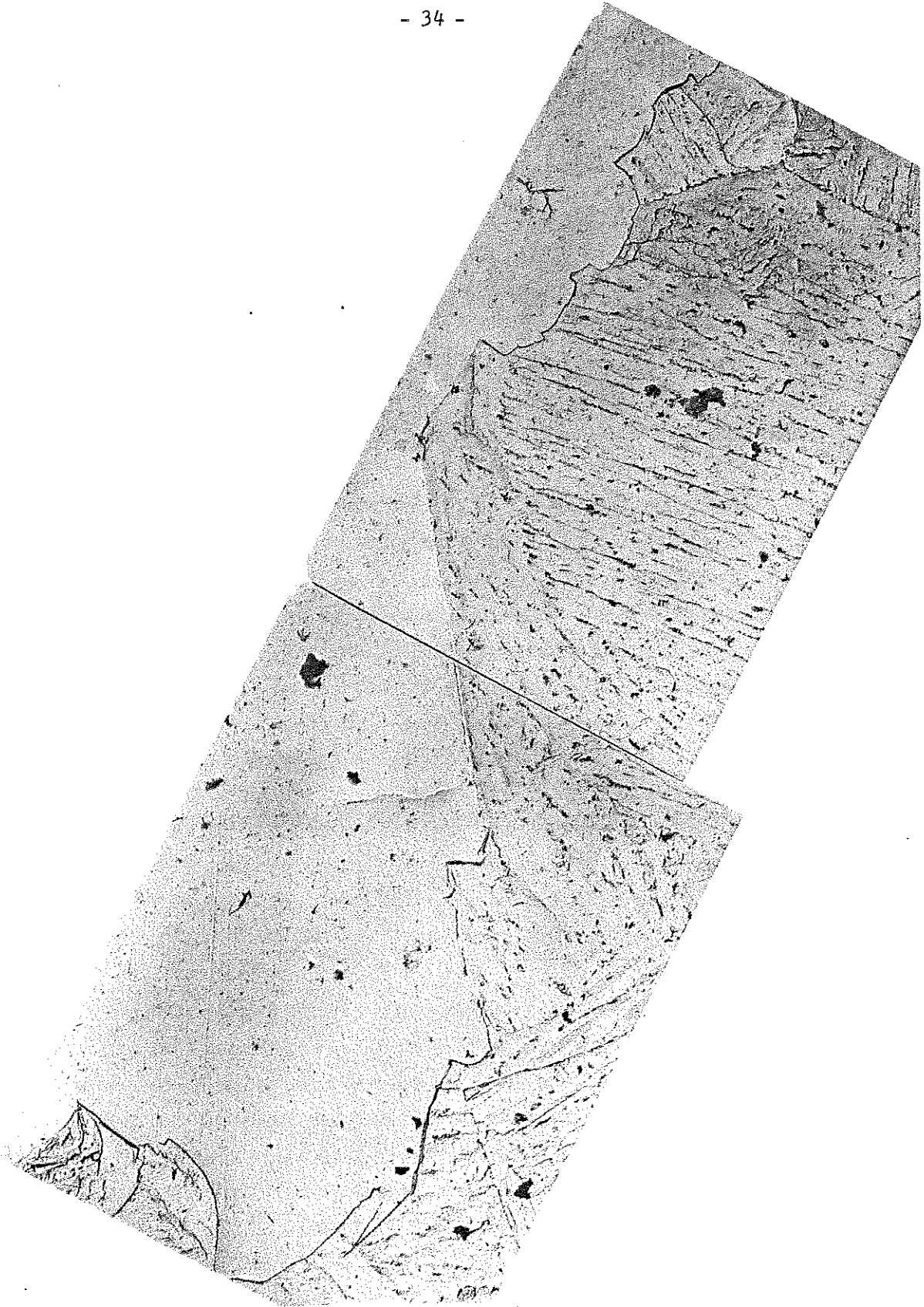
Tableau 2 : Relations entre microstructure, morphologie des cassures et température de transition de résilience

austénitique initial ; la température de transition de résilience s'améliore lorsque l'on affine la microstructure. Cependant, il faut souligner le caractère grossier de ces indications.

Pour la révélation du grain austénitique et du paquet de lattes tout d'abord, aucune des attaques que nous avons essayées ne donne de résultat pleinement satisfaisant.

Pour ce qui est des facettes de pseudo-clivage, même en examinant des clichés stéréoscopiques d'éprouvettes rompues aux plus basses températures, on ne discerne en général que quelques facettes bien délimitées dispersées dans un relief assez confus, facettes que OTHANI et COLL (3) ont su montrer dans leurs publications. Pour notre part, nous estimons impossible de reconstituer tous les faciès de rupture à partir de telles facettes. Il est d'ailleurs vraisemblable que le paquet de lattes ne donne lieu à une facette bien définie que pour des orientations privilégiées de ce paquet par rapport à la propagation de la fissure, comme le suggère la discussion sur la nature de figures de corrosion obtenues sur ces facettes (5) et comme le montre également la micrographie de coupe nickelée de la planche IX.

Ainsi, même en considérant l'information sur le relief fourni par les clichés stéréoscopiques, il est clair que le caractère fragile des faciès considérés correspond à une impression visuelle d'ensemble dont la notion de facette ne rend que très partiellement compte. Dès lors, il paraît illusoire de chercher à utiliser un quelconque algorithme de reconnaissance de contour pour décrire de tels faciès de rupture.



Micrographies électroniques à balayage (X 6000) - répliques au carbone

Planche IX. : Coupe nickelée de faciès de rupture bainitique  
( $\theta_{\gamma} = 900^{\circ} \text{ C}$  - trempe huile)

## CONCLUSION GENERALE

Cet essai de mise en oeuvre de méthodes quantitatives pour caractériser les faciès de rupture fragile de structures de trempe a mis en évidence la grande difficulté de ce problème et n'a pu conduire, dans le cadre de ce contrat, à des applications métallurgiques concrètes.

Pour ce qui est de l'analyse d'images, les faciès étudiés correspondent à ce que, dans la terminologie anglo-saxonne, on appelle des "Textures". Des structures envisagées dans leur ensemble, comme un paysage vu de satellite ou pour ce qui nous concerne l'aspect fragile ou ductile d'une rupture, sont des exemples de "Texture". L'oeil et le cerveau humain reconnaissent et différencient facilement ces images alors que le problème de leur reconnaissance automatique, qui fait l'objet de nombreuses recherches, n'est pas encore résolu.

Néanmoins le contexte de cette étude est un peu différent puisque le fait de disposer de paires stéréoscopiques permet en principe d'accéder au relief. Il est clair, d'après la discussion précédente, que les procédés à utiliser pour mettre en évidence le relief devraient s'inspirer des méthodes cartographiques mises au point dans la première phase de cette étude. A partir de là, on pourrait envisager l'analyse des caractéristiques géométriques et de rugosité de ce relief, notamment par la morphologie mathématique appliquée aux fonctions :

Par exemple, on pourrait obtenir les lignes de partage des eaux de ce relief, les lignes de crête en utilisant le concept de squelette d'une fonction. Signalons à ce sujet que c'est en partie grâce à cette recherche que des progrès importants ont été réalisés dans la conception d'outils morphologiques théoriques appliqués à l'analyse des fonctions. C'est à ce niveau seulement que l'introduction d'hypothèses sur la nature du relief (existence de facettes par exemple) pourrait simplifier le traitement morphologique.

Sur le plan technologique cette étude a mis en évidence les performances trop limitées de l'appareil dont nous disposions et permis d'entrevoir ce que devra être l'analyseur d'images de la prochaine génération. Par exemple, la séquence d'opérations consistant à photographier les faciès puis à reprendre les images par une caméra de télévision (d'où un bruit important) devrait être remplacé par la mise en mémoire numérique directe de cette information.

Enfin, en ce qui concerne les aspects métallurgiques de l'étude et de façon plus générale l'avenir de la fractographie quantitative appliquée aux problèmes métallurgiques, on peut faire les observations suivantes :

Les méthodes d'analyse des clichés stéréoscopiques que nous avons développées montrent que l'introduction dans le cours du calcul d'hypothèses simplificatrices sur la morphologie du relief (présence de facettes par exemple) permet de simplifier largement le traitement ultérieur. Il paraît donc naturel d'utiliser dans une première étape la fractographie quantitative pour ces cas simples, mais on peut se demander a posteriori, considérant l'impossibilité d'appliquer le concept de facette aux faciès de rupture envisagés, s'il n'existe pas des problèmes métallurgiques moins complexes. On peut penser bien sûr à l'étude de la rupture intergranulaire, mais aussi à celle de la déchirure ductile pour laquelle un décompte de la taille et de la forme des cupules, avec corrélation avec la population inclusionnaire, serait particulièrement intéressant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- =====
- (1) - G.R. SPEICH, H. WARLIMONT - JISI (1968), 206, p. 385
  - (2) - J.P. NAYLOR - Thèse INP Lorraine (1976), n° AO 12278
  - (3) - H. OHTANI, T. KUNITAKE, F. TERASAKI, Y. OHMORI -  
Trans. ISIJ (1972), Vol. 12, p. 118 et p. 146.
  - (4) - M.J. ROBERTS - Met. Trans. (1970), 1, p. 3287.
  - (5) - J.P. NAYLOR, P.R. KRAHE - Met. Trans. (1974), 5, p. 1699.  
et (1975), 6, p. 594.
  - (6) - S. BEUCHER, T. HERSANT -- Analyse quantitative de surfaces  
non planes. Application à la description de faciès de  
rupture fragile par clivage. Compte-rendu étude D.G.R.S.T.  
n° 767.1209, 767 1210 (1979)
  - (7) - S. BEUCHER, C. LANTUEJOUL - Use of watersheds in contour  
detection. International workshop on image processing.  
Real-time edge and motion detection/estimation, Rennes  
(1979)
  - (8) - C. LANTUEJOUL, S. BEUCHER -- Geodesic distance and Image  
analysis. Proceedings of ICSS, Salzburg (1979).



A N N E X E I

Morphologie Mathématique et fonctions

Il est possible de définir sur les fonctions des transformations morphologiques, telles l'érosion et la dilatation, et d'itérer ces transformations élémentaires de façon à extraire de la fonction étudiée un certain nombre de caractéristiques morphologiques.

Soit  $f$ , une fonction définie dans  $R^2$  et à valeurs dans  $R$ . On peut définir les seuils de cette fonction. Ce sont des ensembles  $X_\lambda(f)$ , tels que :

$$X_\lambda(f) = \{x \in R^2, f(x) \geq \lambda\}$$

Les transformations morphologiques élémentaires appliquées à cette suite d'ensembles génèrent une autre suite d'ensembles, qui ne sont autre que les différents seuils d'une nouvelle fonction, transformée de la fonction  $f$  initiale.

Ainsi, on pourra définir l'érosion de  $f$  par un élément structurant  $B$  bidimensionnel de la façon suivante :

$f \ominus B$  est la fonction telle que :

$$X_\lambda(f \ominus B) = X_\lambda(f) \ominus B$$

On montre que la valeur de  $f \ominus B$  au point  $x$  n'est autre que la plus petite valeur prise par  $f$  à l'intérieur de  $B$  centré en  $x$ .

De la même façon, la dilatation de  $f$  sera définie par :

$f \oplus B$  est la fonction telle que :

$$X_\lambda(f \oplus B) = X_\lambda(f) \oplus B$$

Munis de ces deux définitions, on retrouve pour les fonctions, mutatis mutandis, les propriétés élémentaires de ces transformations appliquées aux ensembles.

Il est alors possible de définir, en utilisant toujours la même démarche, des transformations plus complexes faisant intervenir des éléments structurants bi-phasés. Ces transformations se ramènent à deux groupes : les épaissements et les amincissements. Elles permettent alors d'appliquer aux fonctions des transformations basées sur des éléments structurants dits de Golay (du nom de l'auteur qui les a appliqués pour la première fois sur les ensembles), et d'étendre ainsi des définitions à l'origine purement ensemblistes, telles le squelette.

On peut également définir des transformations conditionnelles. Donnons à titre d'exemple la définition de l'érosion conditionnelle. Rappelons la définition de l'érosion conditionnelle d'un ensemble  $X$ , à l'extérieur d'un ensemble  $Y$  :  
On la note :

$$X \ominus B, Y = (X \ominus B) \cup Y$$

Soit maintenant deux fonctions  $f$  et  $g$ . On appellera érosion de  $f$  conditionnellement à  $g$ , une fonction notée  $f \ominus B, g$  et définie de la façon suivante :

$$\begin{aligned} X_\lambda(f \ominus B, g) &= X_\lambda(f \ominus B) \cup X_\lambda(g) \\ &= [X_\lambda(f) \ominus B] \cup X_\lambda(g) \\ &= \text{Sup}(f \ominus B, g) \end{aligned}$$

Cette définition fait apparaître une correspondance entre l'opérateur Union défini sur les ensembles et l'opérateur Sup défini sur les fonctions.

En fait, il est possible d'établir une telle correspondance, entre tous les opérateurs ensemblistes et tous les opérateurs algébriques. Cette correspondance permet la transcription en termes algébriques des opérations définies en termes ensemblistes et vice-versa.

L'itération de ces transformations est bien sûr possible. Par exemple l'itération d'une dilatation conditionnelle permettra de reconstituer une fonction  $g$  à partir d'une fonction "marqueur"  $f$  :

$$\{f \oplus B, g\} = \text{inf}(\text{inf} \dots (\text{inf} (f \oplus B, g), g), g \dots), g)$$

(les crochets dans la notation indiquent une itération).

Ce type de transformation permet à partir d'une fonction  $g$  judicieusement choisie, d'extraire les extrema de la fonction  $f$ .