

FR 8601770

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF --8388

M2

ETUDE DE LA FATIGUE THERMIQUE SUPERFICIELLE D'UN ACIER

INOXYDABLE AUSTENITIQUE

LEMOINE, F.; MARINI, B.; MENY, L;

CEA CEN Saclay, 91-Gif-sur-Yvette (France). IRDI, Dept. de Technologie

Communication présentée à : SFM International spring meeting on high-temperature
fatigue
Paris (France)
9-11 Jun 1986

JOURNEES INTERNATIONALES DE PRINTEMPS

PARIS, 9, 10, 11 juin 1986

FATIGUE A HAUTE TEMPERATURE

ETUDE DE LA FATIGUE THERMIQUE SUPERFICIELLE
D'UN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE

P. LEMOINE, B. MARINI et L. MENY

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE
SERVICE DE RECHERCHES METALLURGIQUES APPLIQUEES
Section d'Etude de Modèles et de Mécanique des Matériaux

C.E.A. - C.E.N. SACLAY
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

Résumé

Dans les réacteurs à neutrons rapides, le mélange de flux de sodium à des températures différentes est la source de rapides fluctuations thermiques (thermal striping), qui peuvent provoquer l'apparition et la croissance de fissures sur les parois métalliques voisines. C'est ce type d'endommagement qui est appelé fatigue thermique superficielle.

Le but de cette étude est de déterminer les conditions d'apparition des fissures d'origine thermique à la surface des composants en acier inoxydable. Pour ce faire, une machine d'essai capable de reproduire des conditions de fatigue thermique superficielle a été mise au point. Les premiers essais sont présentés, à partir des observations métallographiques des parois sollicitées et des coupes polies, et des examens microfractographiques des surfaces de fissuration.

L'amorçage, homogène sur l'ensemble de la surface sollicitée, est constitué d'un grand nombre de microfissures ne dépassant pas 50 μm et dont les orientations sont directement liées aux orientations des déformations plastiques principales.

En propagation, les fissures les plus longues (jusqu'à 3 mm) forment un réseau tridimensionnel; elles présentent les mêmes caractéristiques que celles obtenues en fatigue mécanique.

INTRODUCTION

Dans les réacteurs à neutrons rapides, le mélange de flux de sodium à des températures différentes est la source de rapides fluctuations thermiques (thermal striping), qui peuvent provoquer l'apparition et la croissance de fissures sur les parois métalliques voisines. C'est ce type d'endommagement qui est appelé fatigue thermique superficielle, et qui a été déjà observé sur des circuits de sodium expérimentaux aux Etats Unis et en France [1].

Dans les réacteurs, il existe des zones concernées par ces problèmes; par exemple, les structures situées au-dessus du coeur sont soumises à de telles sollicitations, dont le spectre en fréquence présente un maximum aux environs de 1 Hz. Pour les durées de fonctionnement envisagées, les durées de vie correspondantes dépassent 10^6 cycles. Si on se réfère à l'ASME Design Code Case N 47, l'amplitude maximale des fluctuations thermiques ne doit pas dépasser 30 K pour les aciers austénitiques. De même, les règles de dimensionnement utilisées pour Super Phénix, ont repris cette même valeur, qui apparaît être extrêmement conservative. En effet, WOOD [2] propose une valeur maximale de 63 K, qu'il a obtenue par comparaison aux essais de fatigue mécanique à déformation imposée à la température maximale du cycle thermique, après application d'un facteur de sécurité de 2, pour prendre en compte des effets inconnus (vieillessement thermique, corrosion due au sodium, état de surface...).

De même, MARSH [3] a constaté aussi une bonne corrélation entre les courbes de fatigue à déformation imposée et celles obtenues sur un acier austénitique 316 soumis à de la fatigue thermique superficielle avec un effet de seuil de non amorçage correspondant à une amplitude de cyclage de 150 K.

On ne dispose en fait que de peu d'études de ce type, et la majorité des points expérimentaux actuellement utilisables pour établir des règles de dimensionnement correspondent à des essais uniaxiaux et isothermes. Leur validité d'application aux conditions de déformation biaxiale sous cyclage thermique obtenues par "thermal striping" reste à démontrer.

Dans le cas de règles de dimensionnement qui n'admettent pas l'existence de défaut dans les structures, l'étude de l'amorçage revêt un grand intérêt. D'autre part, l'étude de la propagation de fissures amorcées en fatigue thermique superficielle est aussi importante puisqu'elle peut fournir les conditions d'arrêt de ces fissures.

Ce papier décrit les premières expériences réalisées avec une machine de simulation en eau (SPLASH) sur des éprouvettes plates chauffées par effet Joule, et dont deux faces sont refroidies cycliquement par de l'eau pulvérisée.

On s'est attaché ici à décrire la morphologie des réseaux de fissuration qui y apparaissent.

I - EXPERIENCES

Le principe de l'essai est donc de chauffer continûment l'éprouvette (figure 1) par effet Joule à l'aide d'un courant alternatif 50 Hz de 1000 à 2000 A sous quelques volts de tension, et de refroidir cycliquement deux faces opposées, appelées dans la suite face droite et face gauche. Cette trempe superficielle a lieu au travers de fenêtres de dimensions 30 x 10 mm par pulvérisation d'eau à température ambiante ou par jet d'air seulement (figure 2).

La mesure des champs thermiques est réalisée à l'aide de 12 thermocouples répartis sur la peau de l'éprouvette ainsi qu'à mi épaisseur. La figure 3a présente, pour un essai, l'évolution en fonction du temps des températures enregistrées par un thermocouple situé sur la face sollicitée, et par un second situé à 2 mm sous la peau de l'éprouvette. La figure 3b donne les gradients de température obtenus en haut et bas de cycles thermiques sur une demi éprouvette.

Les observations métallurgiques qui suivent concernent deux éprouvettes, numérotées 1 et 2, d'acier austénitique 304, d'épaisseurs différentes (10 et 20 mm), ayant subi un cyclage thermique "identique" ($T_{\max} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) pendant respectivement 20 000 et 100 000 cycles.

II - OBSERVATIONS

II.1 - Observation des faces sollicitées

Après désoxydation, le réseau de fissuration devient très visible: la surface couverte par le réseau de fissuration est comparable à celle de la fenêtre de trempe (figure 4a). Au centre des deux éprouvettes, les fissures constituent des "cellules" de forme presque rectangulaire; sur les bords, les fissures s'orientent radialement et circonférentiellement, pour l'éprouvette 2 (figure 4b), alors qu'elles conservent leurs orientations sur l'éprouvette 1. Les cellules ainsi formées semblent se répartir en deux populations de tailles différentes : la première de 1 à 3 mm, cellules limitées par des fissures ouvertes de plus de 20 μm , la seconde de 200 à 500 μm , cellules limitées par des fissures fines, et qui réalisent un "pavage" des grandes cellules de la première population.

A l'intérieur de ces réseaux de fissurations, il apparaît des microfissures de quelques dizaines de microns, qui constituent un amorçage discontinu associé à des zones de déformation plastique (figure 5).

II.2 - Coupes polies

L'observation des parcours des fissures a été effectuée sur des coupes polies dans les plans longs et travers; les amorçages des fissures sont perpendiculaires au plan sollicité; le parcours des fissures est relativement droit (ép. 1) ou tourmenté et ramifié (ép. 2). Quelques fissures dépassent 2 mm; la plupart sont courtes (< 500 μm). Les positions relatives de ces deux ensembles de fissures permettent de penser qu'ils sont à l'origine des deux populations de cellules décrites précédemment; ce qui a été confirmé par la comparaison détaillée des observations sur la surface et sur coupes polies.

L'amorçage et le parcours des fissures sont entièrement transgranulaires. Le début du parcours (sur 200 μm environ) est peu ramifié; la suite et la fin de fissuration le sont plus, avec des branchements pouvant atteindre 50 μm (figures 6a, 6b).

II.3 - Surfaces de fissuration

Une macrofractographie partielle est présentée figure 7. L'amorçage est discontinu: chaque amorçage donne lieu à une fissure qui se propage avec un front convexe, générant ainsi une surface de fissuration en lunule.

La présence de stries de fatigue a été observée sur toute la surface de fissuration (figure 8). Ces stries ont le même aspect que celles d'une fissuration en fatigue mécanique. Sur l'éprouvette 1, moins oxydée, il a été possible de déterminer par mesure d'interstries la vitesse de propagation de la fissure da/dN en fonction de son avancée (figure 9). La vitesse décroît en fonction de la profondeur de 4.10^{-4} à $1,5.10^{-4}$ mm/cycle. La fissure la plus longue mesure 2,8 mm, ce qui correspond, pour une valeur moyenne de 2.10^{-4} à 14 000 cycles de propagation pour un essai de 20 000 cycles.

III - ETUDE QUANTITATIVE DU RESEAU DE FISSURATION

Le réseau de fissuration de l'éprouvette 2 a été caractérisé quantitativement par analyse d'image [4].

Pour ce faire, le facteur largeur de fissures est éliminé par une squelettisation; l'image obtenue est digitalisée, en utilisant une grille à réseau hexagonal, et étudiée sur un analyseur de texture (TAS, fabriqué par LEITZ)*. L'ensemble du réseau est divisé en champ de mesures de surface C, repérés de 1 à 20 (figure 10), dans lesquels les mesures suivantes sont effectuées :

- longueur fissurée en millimètres
- densité de fissure en mm^{-1} mesurée sur champs ($C = 17,6 \text{ mm}^2$) et quarts de champs ($c = 4,4 \text{ mm}^2$).
- nombre de points triples
- histogrammes des longueurs de segments entre points triples
- rose des directions des segments, qui caractérisent l'anisotropie de la fissuration

La longueur totale fissurée est de 662 mm pour une surface de 273 mm^2 , soit une densité moyenne de $2,42 \text{ mm}^{-1}$.

* Ces résultats ont été obtenus au service de métallographie de l'IRSID - SAINT GERMAIN EN LAYE, par H. DEMAGNY et O. GREGOIRE.

La densité maximale mesurée sur quart de champ c est de $3,86 \text{ mm}^{-1}$. En classant les valeurs de densités de fissuration sur les 20×4 quarts de champ en trois catégories, on obtient une carte (figure 11) qui met en évidence une couronne très fissurée entourant une zone centrale moins fissurée. De même, la carte des points triples montre une couronne riche, entièrement contenue dans la précédente (figure 12). La correspondance entre les deux cartes montre que la zone centrale, très fissurée, mais à nombre de points triples moyen, contient surtout de longs segments de fissures. Ceci est confirmé par les histogrammes de segments des champs concernés. Les roses des directions indiquent que la direction privilégiée est perpendiculaire à la plus grande dimension de l'éprouvette; il est difficile de caractériser une autre direction privilégiée.

IV - DISCUSSION

L'interprétation de ces résultats nécessite la connaissance précise des champs de contraintes et de déformation régnant dans l'éprouvette en cours d'essai. Nous avons décidé de les calculer par éléments finis; ces calculs sont en cours. L'interprétation actuelle ne peut être que qualitative.

La surface de l'éprouvette est plastifiée au cours de l'essai. Cette zone plastique s'étend dans l'éprouvette sur une profondeur de quelques centaines de microns; ensuite, jusqu'au centre de l'éprouvette, le matériau reste élastique. Pour un tel schéma, l'amorçage doit être contrôlé par l'amplitude de déformation en surface; le début de propagation a lieu dans un matériau plastifié et la suite de la propagation ayant lieu dans le domaine élastique doit être contrôlée par le facteur d'intensité de contrainte K .

Plus précisément, l'amorçage se produit en surface de façon discontinue sous forme de microfissures de quelques dizaines de microns; elles s'orientent suivant deux directions perpendiculaires. Dans le cas de l'éprouvette 1, ces deux directions correspondent aux sens long et travers de l'éprouvette. Par contre, dans le cas de l'éprouvette 2, ces deux directions dépendent du point d'observation.

La différence essentielle entre ces deux essais est le confinement de la zone de trempé qui est réalisé dans le cas 2 et pas dans le cas 1. Il est évident que l'éprouvette est plastifiée à partir de la peau sur une certaine profondeur. L'état de déformation étant triaxial, nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : l'amorçage a lieu suivant les deux directions principales des déformations de la surface. Après l'amorçage d'un nombre suffisant de fissures, et leur propagation dans la zone plastifiée en peau de l'éprouvette, ces fissures se rejoignent, et continuent simultanément leur propagation vers l'intérieur de l'éprouvette; à partir de ce moment s'opère une sélection parmi l'ensemble des fissures qui se réalise par déchargement mutuel : Dès que l'une d'entre elles s'est plus propagée que ses voisines, elle ralentit leur propagation; à leur tour, ces fissures, déchargeant moins la première, vont faciliter sa propagation. D'autre part, les fissures tendant à trouver une forme d'équilibre, celles qui sont les plus profondes vont donc pouvoir se développer en surface au détriment des moins profondes.

Ce processus auto accéléré peut expliquer l'apparition de cellules de tailles différentes observées sur les surfaces sollicitées, ainsi que les fissures très longues (> 2 mm) observées sur coupes polies, qui existent simultanément avec des fissures n'ayant pas dépassé le stade de l'amorçage

V - CONCLUSION

1 - Après 100 000 cycles et avec une variation de température de 500 °C en paroi, nous avons obtenu des fissures de 2 à 3 mm de profondeur, associées à un faïençage thermique intense sur 273 mm² de la surface de l'éprouvette.

2 - L'amorçage est discontinu, transgranulaire et apparaît sur la surface plastifiée de l'éprouvette sous forme de microfissures, orientées suivant les axes principaux des déformations. Il est donc contrôlé par la variation de déformation plastique imposée par le cyclage thermique.

3 - La propagation commence sur un nombre important de fissures, mais la diminution du ΔT en fonction de la profondeur et le déchargement mutuel des fissures voisines conduisent à ce que quelques fissures seulement poursuivent leur propagation. La distance qui sépare ces dernières correspond à la taille des grandes cellules de faïençage.

4 - Les mesures d'interstries fournissent des vitesses de propagation comprises entre 4.10^{-4} et $1,5.10^{-4}$ mm/C. La propagation a lieu dans une zone élastique et peut être décrite en utilisant le facteur d'intensité de contrainte K.

--oOo--

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. PRADEL
The main objectives of thermal striping studies in progress for French LMFBR Thermal hydraulic and design aspects.
Pressure Vessel Piping Conference - Vol. 98-8, pp. 143-146
La Nouvelle Orléans - U.S.A. - June 1985
- [2] G.J. LLOYD et D.S. WOOD
Int. J. Press. Ves. and Piping, 255-272 (1980)
- [3] D.J. MARSH
Fatigue crack initiation and propagation in stainless steels subjected to thermal cycling conditions.
Fatigue of Engineering Materials and Structures, 179-195, 2, 4, (1981)
- [4] M. COSTER, J.L. CHERMANT
Précis d'analyse d'images
Paris - Editions du CNRS - 1985

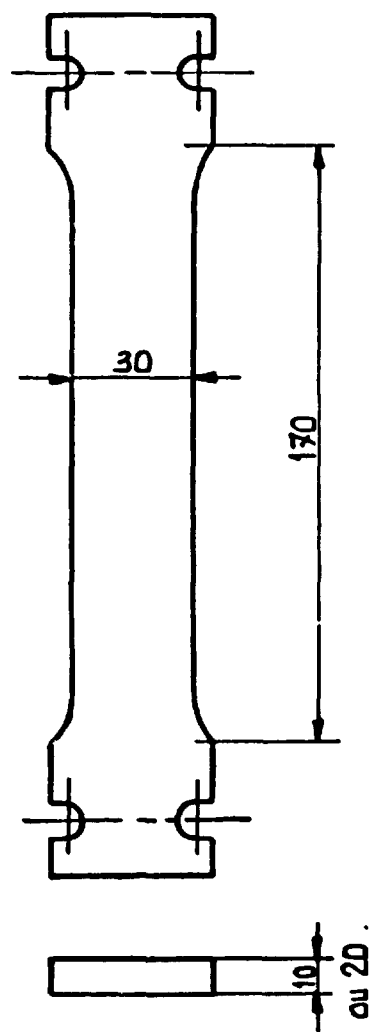


FIGURE 1
GÉOMETRIE DE
L'ÉPROUVETTE.

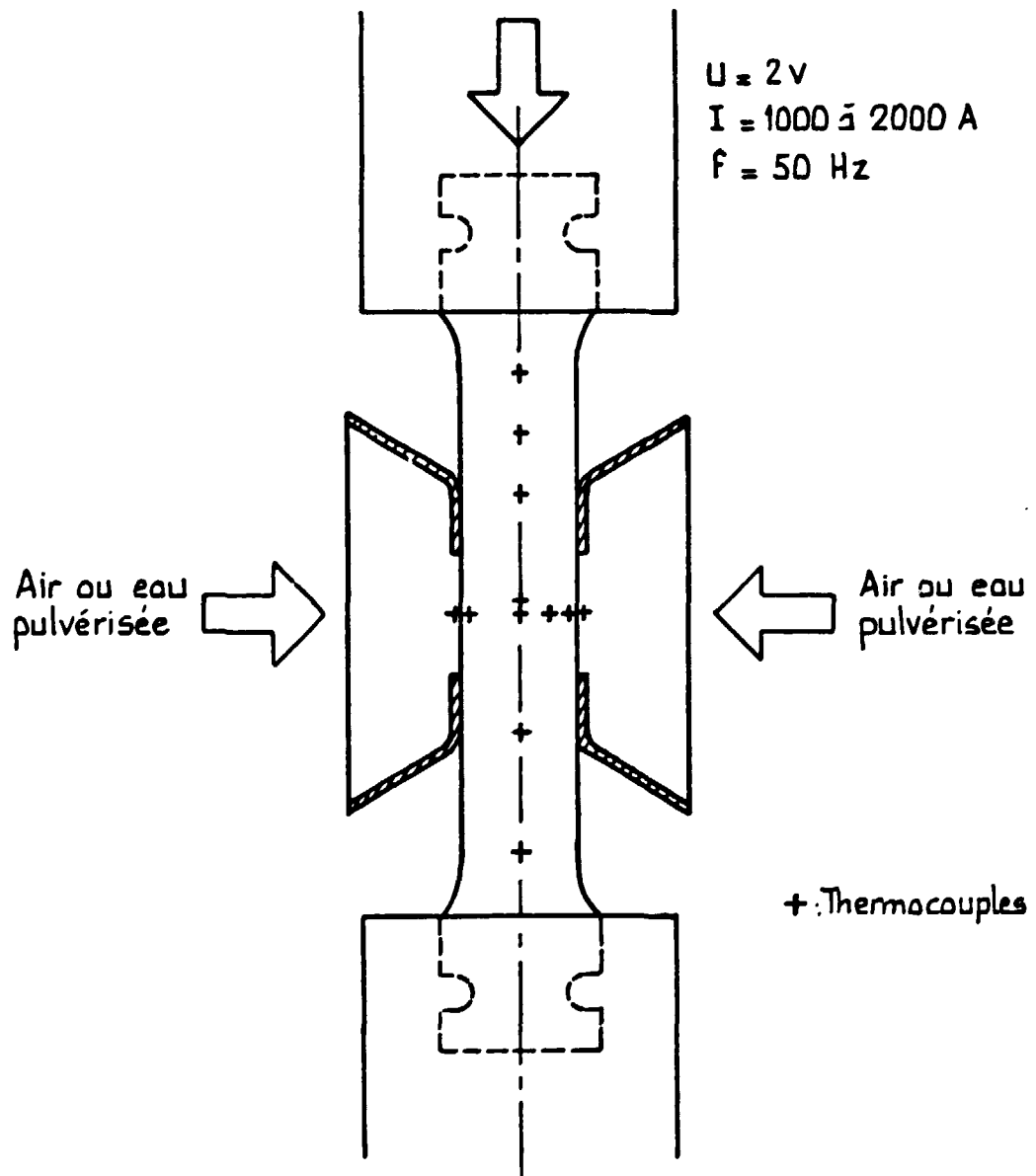


FIGURE 2 - PRINCIPE DES ESSAIS

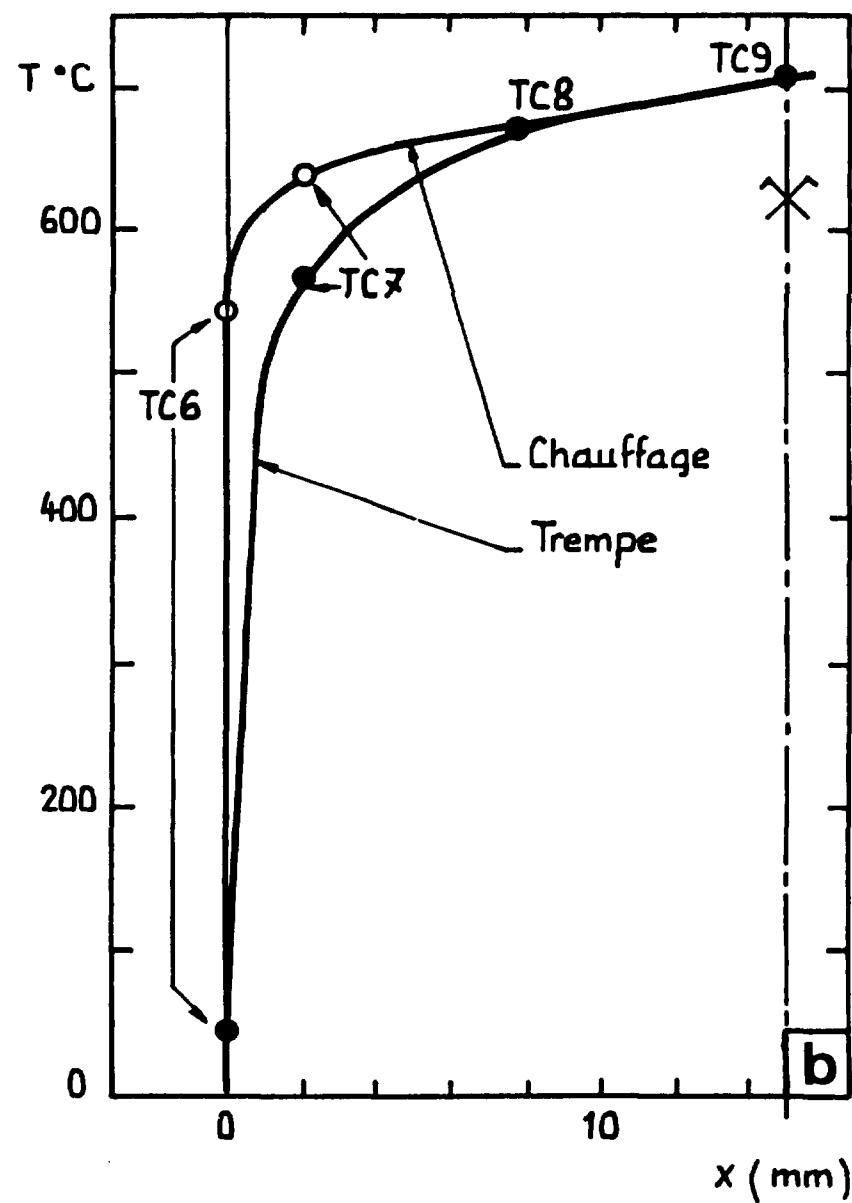
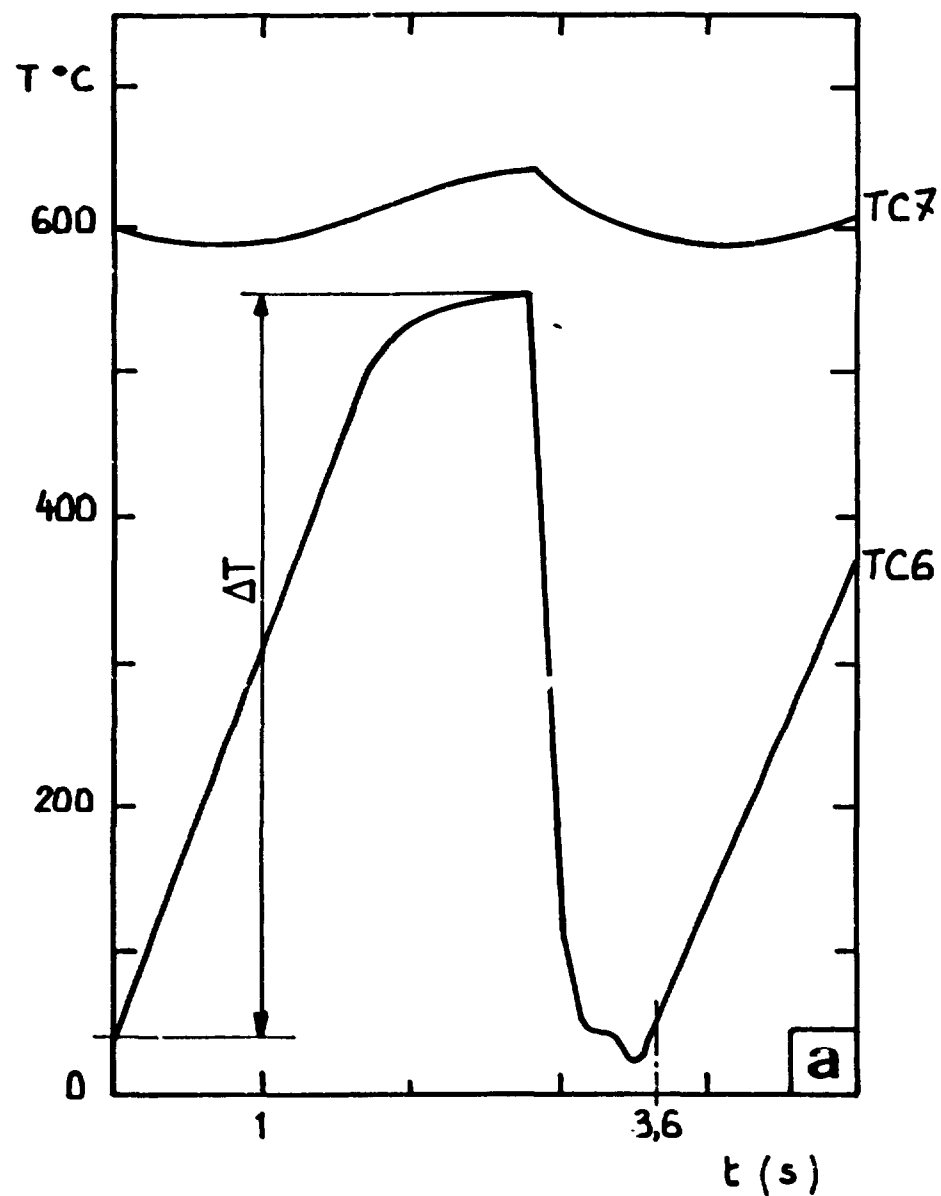


FIGURE 3 - **a**: CYCLES DE TEMPERATURE - **b**: GRADIENT DE TEMPERATURE.

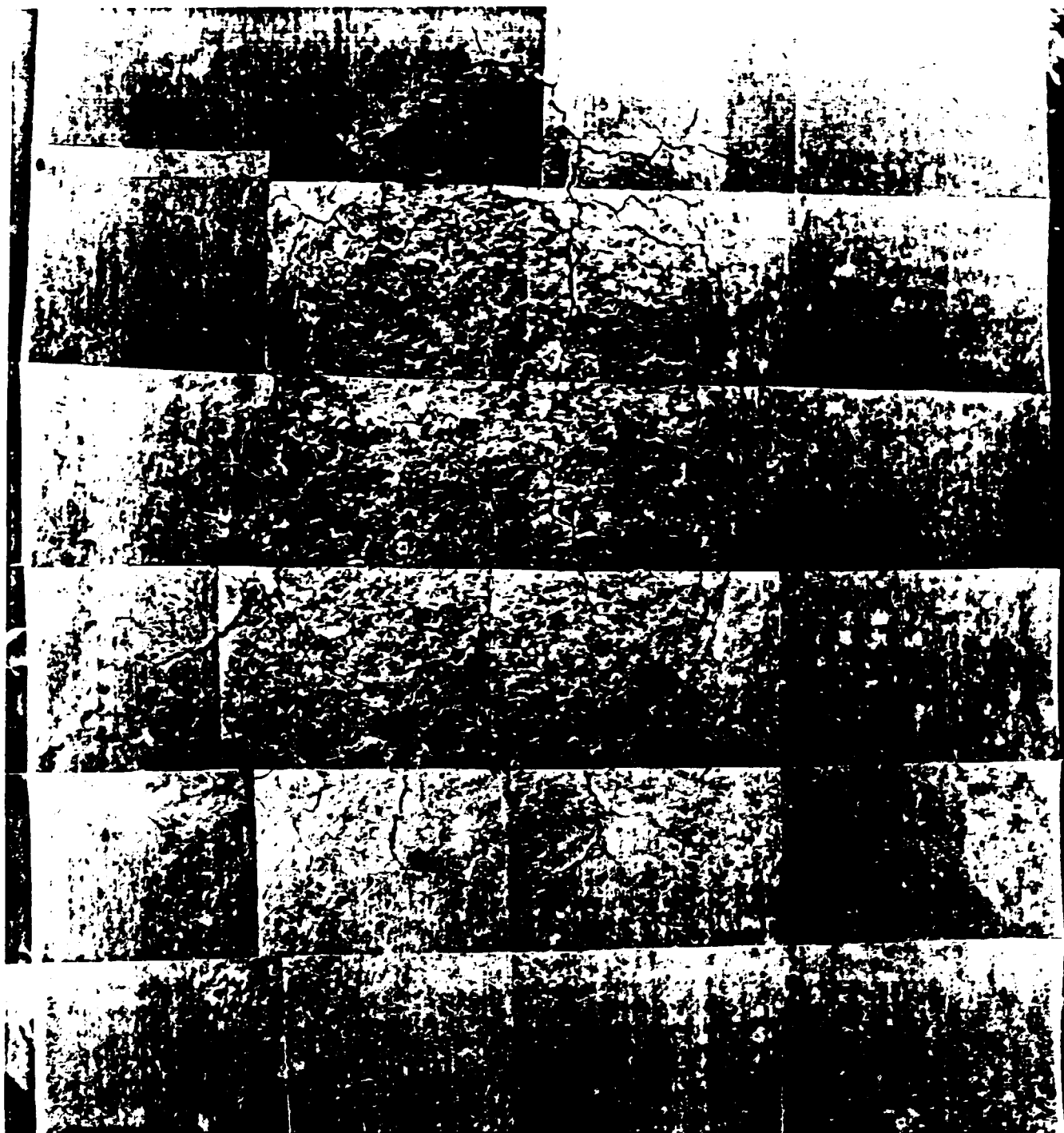


FIGURE 4a - EPROUVETTE 2 - FACE DROITE
RESEAU DE FISSURATION



FIGURE 4b - EPROUVETTE 2 - FACE DROITE
RESEAU DE FISSURATION - DETAIL A

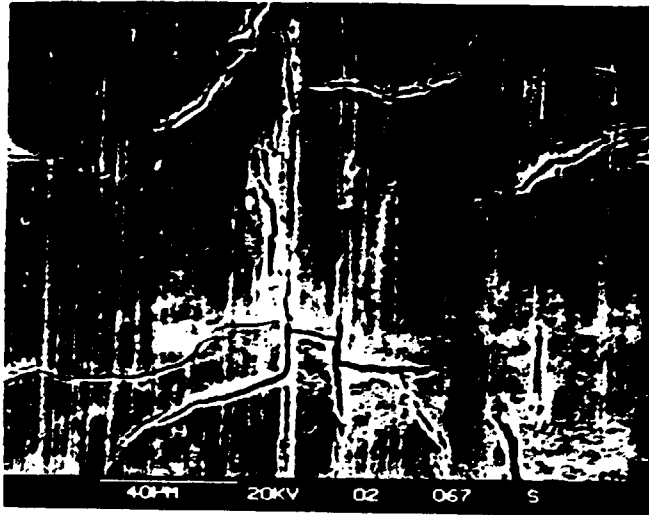


Figure 5 - Eprouvette 1 - Amorçages associés
à des zones de déformation plastique

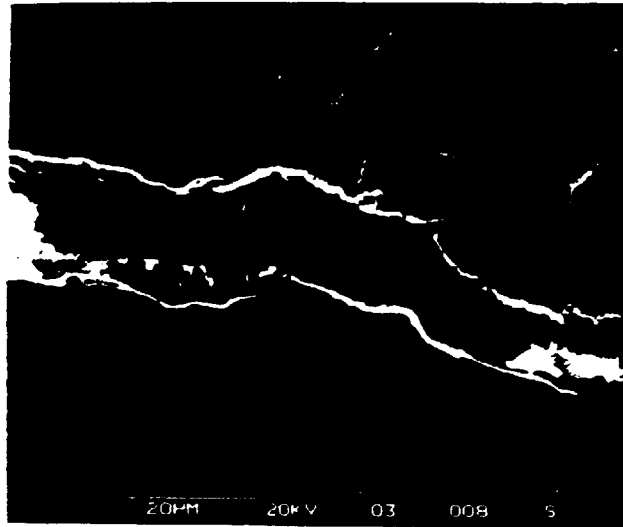


Figure 6a - Eprouvette 1
Amorçage transgranulaire

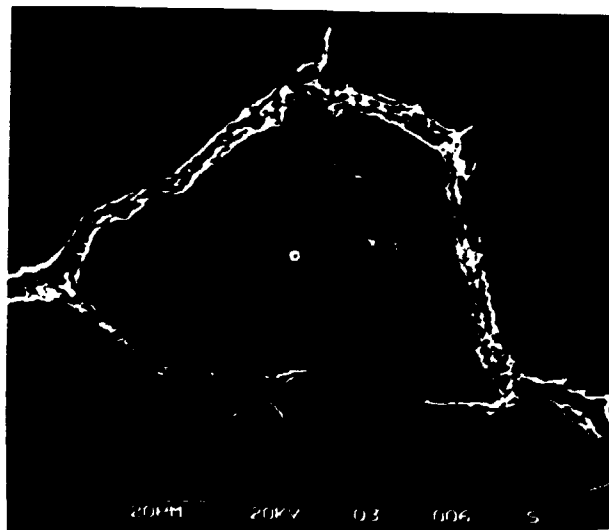


Figure 6b - Détails de la propagation

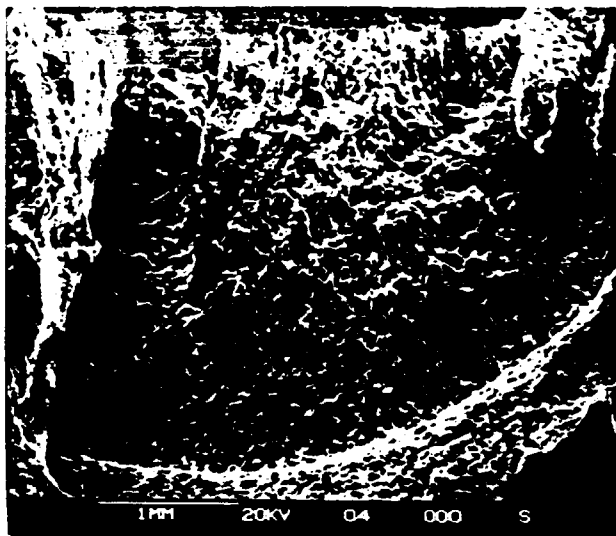


Figure 7 - Eprouvette 1
Macrofractographie

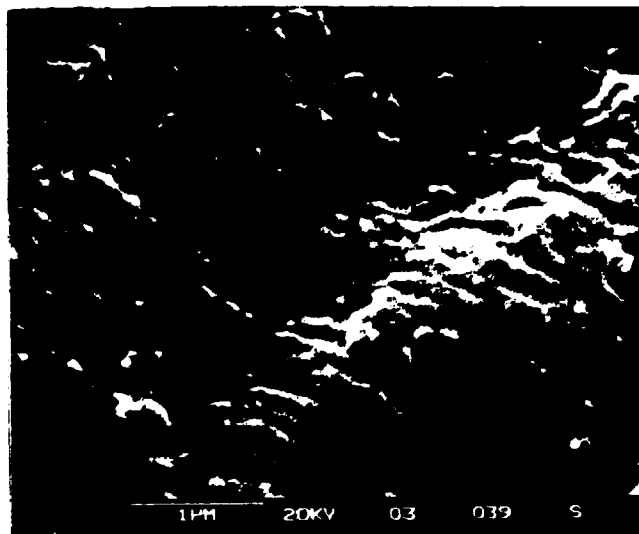


Figure 8 - Eprouvette 1 - Stries de fatigue
 $a = 2 \text{ mm}$; $da/dN = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ mm/c.}$

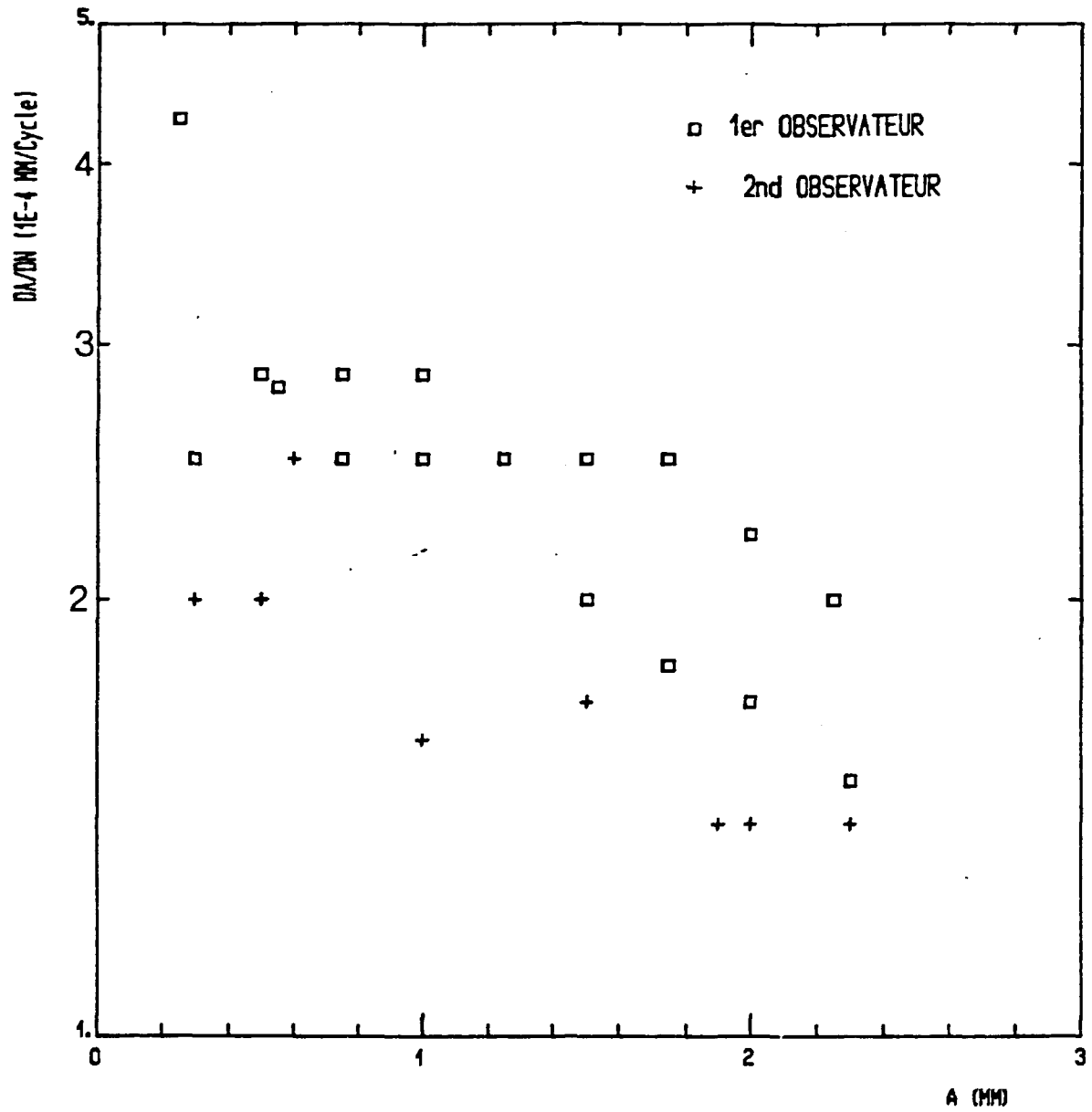


FIGURE 9 - EPROUVETTE 1 VARIATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE L'AVANCEE DE LA FISSURE.

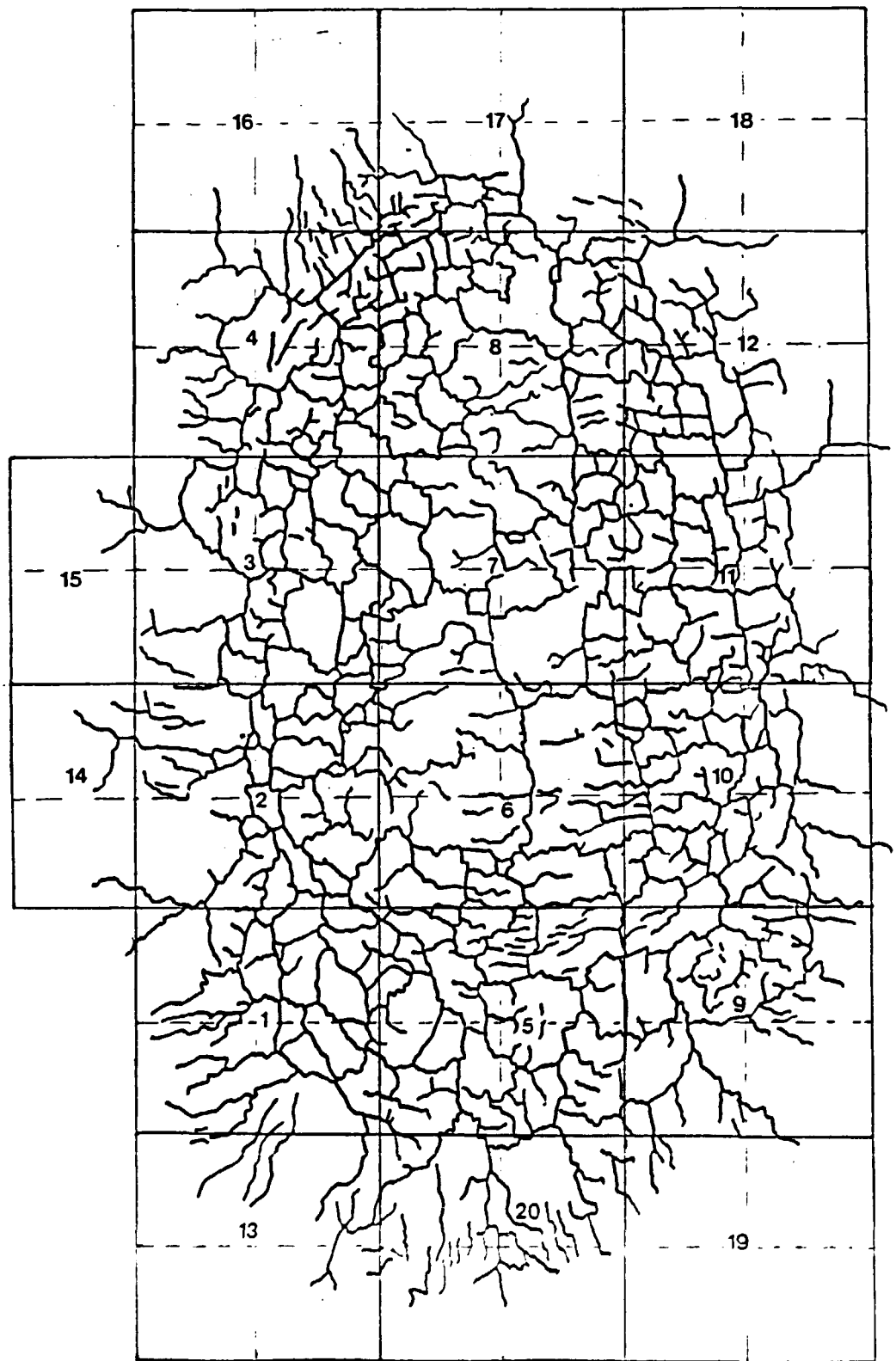
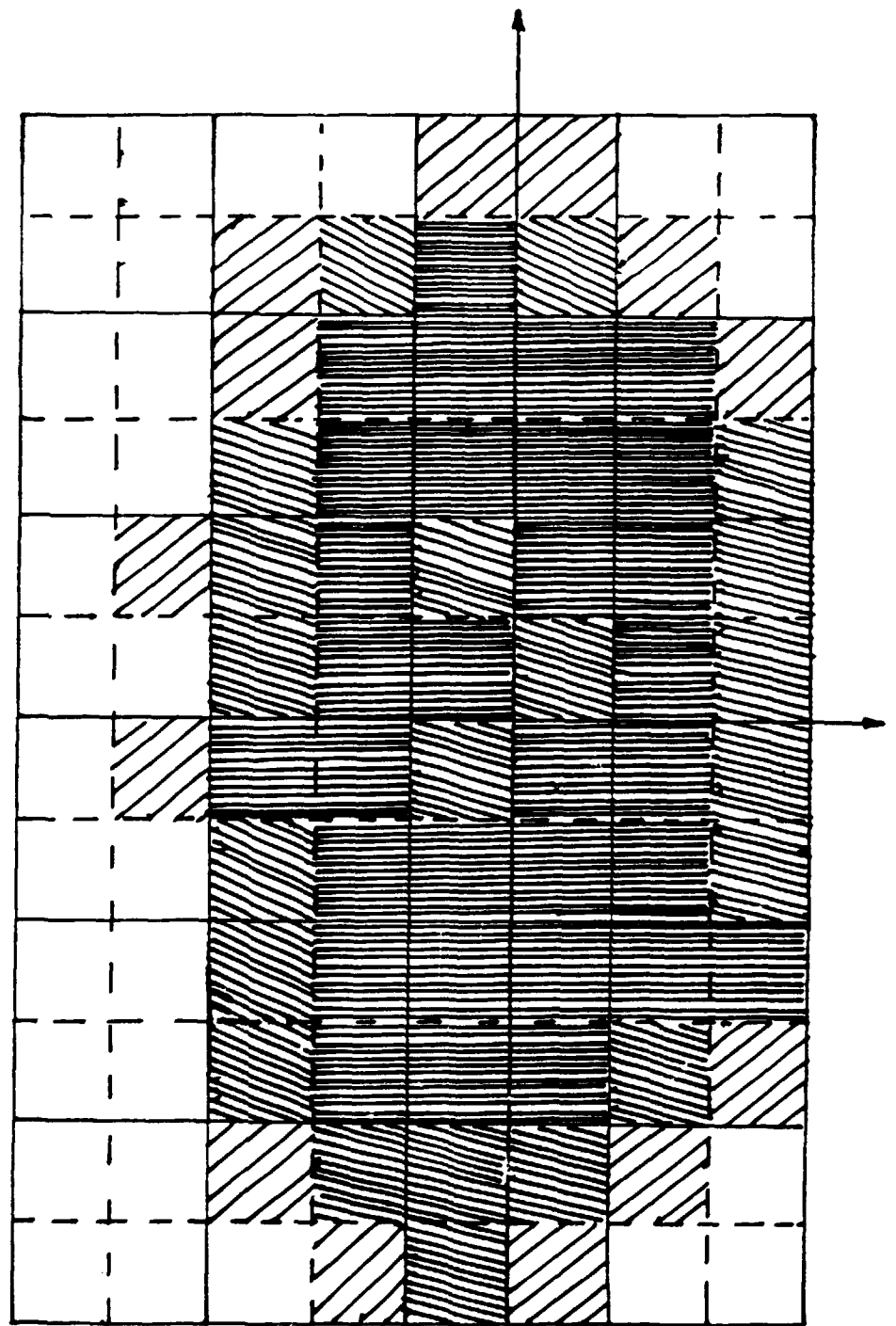


FIGURE 10 - EPROUVETTE 2
RESEAU DE FISSURATION SQUELETTISE ET CHAMPS DE MESURES






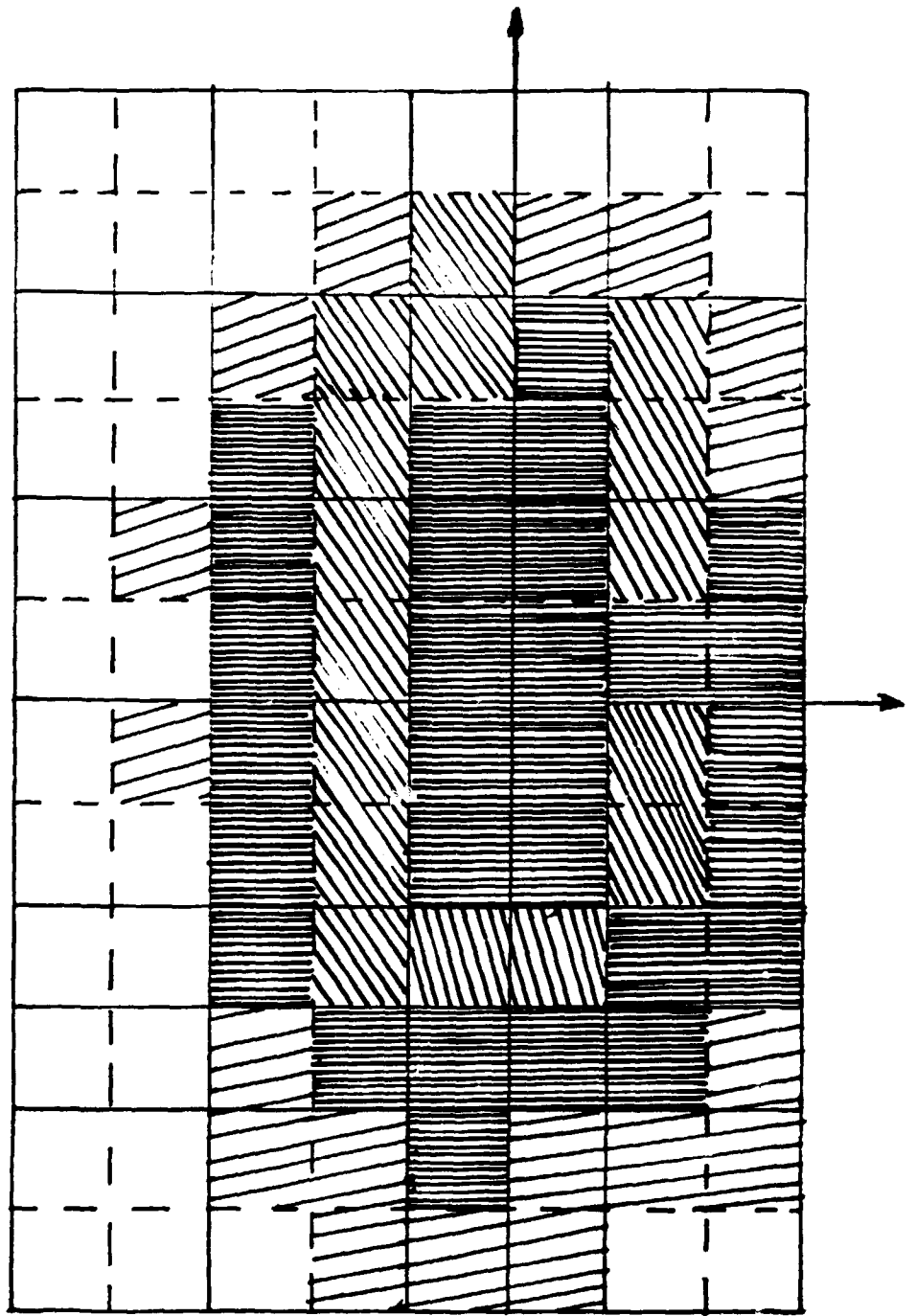
 0 à 1,2
  1,2 à 2,5
  2,5 à 3,86 mm⁻¹

FIGURE 11 - EPROUVETTE 2
CARTE DES DENSITES DE FISSURATION






 0 à 5
  6 à 15
  16 à 26

FIGURE 12 - EPROUVETTE 2
 CARTE DE LA REPARTITION DES POINTS TRIPLES