



HAL
open science

TRACTION ET CISAILLEMENT DYNAMIQUES D'UN COMPOSITE CARBONE/CARBONE TRIORTHOGONAL

J. Lequertier, H. Yang, C. Chiem

► **To cite this version:**

J. Lequertier, H. Yang, C. Chiem. TRACTION ET CISAILLEMENT DYNAMIQUES D'UN COMPOSITE CARBONE/CARBONE TRIORTHOGONAL. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3-61-C3-67. 10.1051/jp4:1991308 . jpa-00249899

HAL Id: jpa-00249899

<https://hal.science/jpa-00249899>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**TRACTION ET CISAILLEMENT DYNAMIQUES D'UN COMPOSITE
CARBONE/CARBONE TRIORTHOGONAL**

J.M. LEQUERTIER*, H.K. YANG** et C.Y. CHIEM**

* AEROSPASTIALE/AQUITAINE, Département TA/N, Division
Systèmes Stratégiques et Spatiaux, Etablissement
d'Aquitaine, BP. 11, F-33165 Saint Médard en Jalles cedex,
France

** E.N.S.M., Département Matériaux, Equipe Plasticité
Dynamique, 1, rue de la Noë, F-44072 Nantes cedex 03, France

Résumé - Un matériau composite tri-orthogonal carbone/carbone (3D-BRAI) a été soumis à des essais de traction et de cisaillement dynamiques à l'aide du système de barres de Hopkinson ($\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$). Les contraintes maximales de traction et de cisaillement dynamiques sont influencées par la vitesse de déformation, par contre, la sensibilité de la contrainte à la "limite d'écoulement" est relativement faible par rapport à celle de la contrainte maximale. Les observations microstructurales permettent de distinguer les différences dans le comportement de ces matériaux soumis à des sollicitations initiales différentes et des vitesses de déformation variées.

Abstract - A tri-orthogonal carbon/carbon composite (3D-PITCH) has been tested in dynamic tensile and shear loadings using split Hopkinson bar technique for strain rates between 10^2 and 10^3 s^{-1} . The result shows high sensitivity of ultimate stress in comparison to the apparent yield stress in dynamic tensile and shear loading tests. Microstructural observation show the different features of fracture surfaces according to various strain rates and types of loading

I. INTRODUCTION

Cette étude fait partie d'une coopération entre le Laboratoire Matériaux de l'Aérospatiale/Aquitaine et l'Equipe de Plasticité Dynamique de l'ENSM de Nantes. Elle contribue à la compréhension du comportement d'un matériau composite Carbone/Carbone sollicité en déformation à grande vitesse, soit par onde de contrainte.

Les barres de Hopkinson sont utilisées pour les essais en traction dynamique, et pour les essais en cisaillement dynamique. Le matériau est testé dans une gamme de vitesse de déformation de 10^2 à 10^3 s^{-1} . Les essais en sollicitations dynamiques reposent sur la théorie de la propagation des ondes élastiques.

Les courbes "contrainte-déformation", les relations entre la contrainte maximale et la contrainte de "limite d'écoulement" macroscopique en fonction de la vitesse de déformation et la sensibilité évolutive de la contrainte à iso-déformation permettent de comprendre les influences des paramètres mécaniques et les mécanismes de rupture et d'endommagement dûs aux chocs sur les matériaux composites Carbone/Carbone.

Ce dernier aspect des mécanismes de rupture et d'endommagement qui peuvent être lié soit à la microstructure soit à la mésostructure ou bien aux deux, est discuté à l'aide de micrographies en microscopie électronique à balayage.

II. MATERIAU TRI-ORTHOGONAL : 3D-BRAI

Les essais de traction et de cisaillement dynamiques ont été réalisés à l'aide du système de barres de Hopkinson. Le principe de barres de Hopkinson a déjà été mentionné dans les précédentes publications de CHIEM C.Y. et al.⁽¹⁾⁽²⁾ pour le domaine dynamique en compression, cisaillement et traction.

II.1 Traction Dynamique : T1

1-1 Courbes de "Contrainte-Déformation"

Les pentes élastiques (module de Young) de traction dynamique ne sont pas influencées par la vitesse de déformation; mais au niveau de la déformation critique, elle augmente en fonction de la vitesse de déformation. Pour une vitesse de déformation de 467 s^{-1} , la déformation critique est de 1,0% à la contrainte maximale de 223 MPa; pour une contrainte maximale de 204 MPa, on a 0,2% de déformation critique à une vitesse de déformation de 73 s^{-1} (Figure 1).

1-2 Influence de la vitesse de déformation

Malgré la dispersion des résultats, on note quand même une tendance globale en ce qui concerne la valeur de la sensibilité de la contrainte maximale à la vitesse de déformation ($m = 0,69$); La figure 2 présente la dispersion de ces valeurs de contrainte maximale en fonction de la vitesse de déformation en dynamique.

1-3 Coefficient λ de sensibilité évolutive de la contrainte à iso-déformation

Nous avons défini un coefficient de sensibilité évolutive de la contrainte à la vitesse de déformation $\lambda = \Delta\sigma/\Delta(\text{Log } \dot{\epsilon})$ pour les divers types d'essai (λ est évolutif en fonction de la déformation); une expression qui semble pour l'instant décrire assez bien le comportement du matériau dans la fenêtre 10^2 et 10^4 s^{-1} est de la forme :

$$\sigma/\sigma_{st} = (A + m \log \dot{\epsilon})$$

m ; coefficient de sensibilité de la contrainte à iso- déformation moyenne

A ; coefficient lié à une notion de contrainte au seuil dynamique de la fenêtre d'application (il faut spécifier que A diffère en fonction du type de sollicitation et de la constitution du composite).

σ_{st} ; la contrainte de rupture en quasi-statique ⁽³⁾.

Les valeurs de λ augmentent sensiblement jusqu'à 0,03% pour deux vitesses de déformation 155 et 260 s^{-1} . Pour celle de 260 s^{-1} , l'accroissement de λ est plus prononcé et se continue entre $\lambda = 2,6$ et $\lambda = 4$ tandis que le cas de $\dot{\epsilon} = 155 \text{ s}^{-1}$ accuse une très faible diminution de λ entre 0,03% et 0,08% de déformation après la "limite d'écoulement" macroscopique (Figure 3).

II.2 Cisaillement Dynamique : S1 et S2

2-1 Courbes "Contrainte-Déformation"

Une particularité dans les résultats de cisaillement dynamique du composite 3D-BRAI est la valeur importante des déformations macroscopiques qui peuvent atteindre 20%, 30% ou 40% selon la vitesse de déformation. La constatation de ce phénomène montre qu'après avoir atteint une certaine valeur maximale de la contrainte, cette dernière n'évolue plus avec l'accroissement de la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$; par contre, la déformation macroscopique s'accroît continuellement avec la vitesse de déformation. Il se présente comme si à partir d'une valeur de contrainte critique, l'énergie globale engendrée par le choc est absorbée dans le matériau uniquement par le biais de la déformation globale.

a) Cisaillement Dynamique (S1) : La figure 4 montre trois courbes de "contrainte-déformation" représentatives de l'évolution du comportement du 3D-BRAI en cisaillement avec trois vitesses de déformation: 2314 s^{-1} , 3549 s^{-1} et 5203 s^{-1} .

Ces courbes montrent que la contrainte critique augmente avec la vitesse de déformation. Pour une vitesse de déformation de 2314 s^{-1} , la contrainte critique est de 26 MPa pour 22% de déformation, et lorsque la vitesse de déformation est plus élevée (5203 s^{-1}), la contrainte critique correspondante est de 35 MPa.

b) Cisaillement Dynamique (S2) : La déformation critique est augmentée en fonction de la vitesse de déformation. Trois courbes "contrainte-déformation" représentatives sont montrées sur la figure 5. Pour la vitesse de déformation la plus élevée 5991 s^{-1} , la déformation critique est de 35%.

2-2 Influence de la vitesse de déformation

a) Cisaillement Dynamique (S1) : La figure 6 montre les valeurs de contrainte maximale et de contrainte de "limite d'écoulement" pour une gamme de vitesse de déformation entre 10^3 et 10^4 s^{-1} . la sensibilité de la contrainte maximale à la vitesse de déformation est importante ($m = 0,87$), et celle de la contrainte de "limite d'écoulement" est moins influencée par la vitesse de déformation ($m = 0,16$).

b) Cisaillement Dynamique (S2) : Pour le 3D-BRAIS2, la valeur de la sensibilité en cisaillement dynamique est de 0,31 pour la contrainte maximale et celle de sa "limite d'écoulement" est de 0,04. Dans le cas du cisaillement dynamique S2, deux des valeurs de sensibilités sont moins importantes que celles dans le cas du cisaillement dynamique S1 pour une gamme de vitesse de déformation située entre 10^3 et 10^4 s^{-1} (Figure 7).

2-3 Coefficient λ de sensibilité évolutive de la contrainte à iso-déformation

Dans le cas du 3D-BRAI en S2, la déformation critique la plus grande atteinte pour la vitesse de déformation de 9511 s^{-1} est de 9,6%; d'où le calcul des valeurs de λ s'effectue dans les limites de 6% de déformation macroscopique pour des raisons liées à la microstructure. La même tendance d'évolution de γ s'observe pour 2203 et 5757 s^{-1} . Dans le cas où $\dot{\gamma} = 5991 \text{ s}^{-1}$, λ décroît de 0,17 jusqu'à 0,03 ($\gamma = 2\%$) pour devenir proche de zéro entre 2% et 6% de déformation en cisaillement dynamique (Figure 8).

III. OBSERVATIONS MICROSTRUCTURALES

L'état microstructural des éprouvettes a été observé après les essais afin de mieux cerner les effets de la sollicitation à grande vitesse sur la réponse de ces composites Carbone/Carbone. Ces travaux d'observations microstructurales s'effectuent également sur les éprouvettes sollicitées par divers types de chargement : traction et cisaillement afin de distinguer les différences dans le comportement de ces matériaux soumis à des sollicitations initiales différentes et des vitesses de déformation variées.

III.1. Traction

Dans le cadre des considérations macroscopiques du comportement mécanique global, nous avons analysé les courbes d'essais qui ont permis de constater que :

- la déformation du matériau diminue avec la vitesse de déformation;
- la contrainte augmente avec la vitesse de déformation;
- l'énergie nécessaire à la déformation diminue avec la vitesse de déformation (On observe en dynamique un phénomène de déchaussement des torons plutôt que celui des fibres que l'on observe dans le cas d'essais statiques).

Au niveau microstructural, il faut noter que globalement le 3D-BRAI répond à une sollicitation de traction dynamique de la façon suivante :

- Rupture des interfaces Toron/Toron aux grandes vitesses de déformation (155 s^{-1}), qui entraîne l'écroulement en blocs de l'architecture globale du composite.
- En statique, on observe plutôt une décohésion des fibres avec un phénomène de déchaussement des fibres sur de grandes longueurs (Figure 9).

- Aux vitesses de déformation intermédiaires, on note le même phénomène avec une diminution de la longueur de déchaussement des fibres (Figures 10).

III.2. Cisaillements dynamiques S1 et S2

On observe bien la décohé sion entre Torons/Torons dans le sens perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde de choc en même temps qu'une décohé sion d'un toron sur toute sa longueur dans le plan de la surface de rupture parallèle à la direction de propagation de l'onde (Figures 11).

Dans le cas d'un cisaillement de type S2, comme la direction de la sollicitation est orthogonale à celle du cas précédent, la décohé sion engendre une surface de rupture moins nette que le cas précédent (Figure 12).

IV. CONCLUSIONS

1. En traction dynamique, les composites carbone-carbone présentent une variation du module de Young après la première "limite d'écoulement" en fonction de la vitesse de déformation; plus la vitesse est grande plus la pente élastique est faible. La microstructure de l'architecture qui se trouve ébranlé et certains torons déplacés ou enfoncés joue le rôle d'absorbeur d'énergie dès la partie élastique du comportement. Par conséquent, on remarque qu'aux grandes vitesses de déformation, les valeurs de déformation deviennent de plus en plus importantes alors qu'il y a comparativement peu d'augmentation de la contrainte.

2. En cisaillement dynamique, les composites carbone ne présentent pas de variation du module de Young en fonction de la vitesse de déformation; par contre la déformation augmente en fonction de la vitesse de déformation sans pour autant augmenter la contrainte maximale qui semble être la contrainte à la rupture globale puisque les éprouvettes sont effectivement cassées en deux à la fin des essais.

Un aspect très particulier du cisaillement dynamique dans ces matériaux est la très faible sensibilité de la contrainte maximale et de la contrainte de "limite d'écoulement" à la vitesse de déformation.

3. Dans le domaine des vitesses de déformation que les ondes de contraintes des barres de Hopkinson permettent d'atteindre, la tendance des réponses de la microstructure de composites carbonés que nous avons étudiés dans ce travail est la suivante :

* En traction dynamique, les fibres sont coupées nettes au niveau de leur toron alors qu'en statique, on observe divers niveaux de filaments de fibres qui émergent du plan normal de la surface de rupture.

* En cisaillement dynamique, la décohé sion entre Torons/Torons est bien observée dans le sens perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde de choc.

V. BIBLIOGRAPHIES

/1/ CHIEM C.Y., LIU Z.G., "The relationship between tensile strength and shear strength in composite materials subjected to high strain rate", J.E.M.T.(ASME), Oct.1987.

/2/ H.K.YANG, J.M.JAMET et C.Y.CHIEM, "Comprtement dynamique de matériaux composites organiques", JNC7, Lyon, 1990.

/3/ J.M.LEQUERTIER : "Les composites thermostructuraux Carbone/Carbone Inox : comportement mécanique et technique de la protection anti-oxydation", JNC7,Lyon,1990.

/4/ CHIEM C.Y., YANG H.K., ROUXEL A, COZIC R., PRIEM D.,: Rapport technique final, ENSM, 1989.

/5/ E.M. SILVERMAN, R.A. GRIESE, & W.C.FORBES : "Property performance of thermoplastic composites for spacecraft systems", SAMPE Journal, Vol.25, No.6,Nov/Dec. 1989.

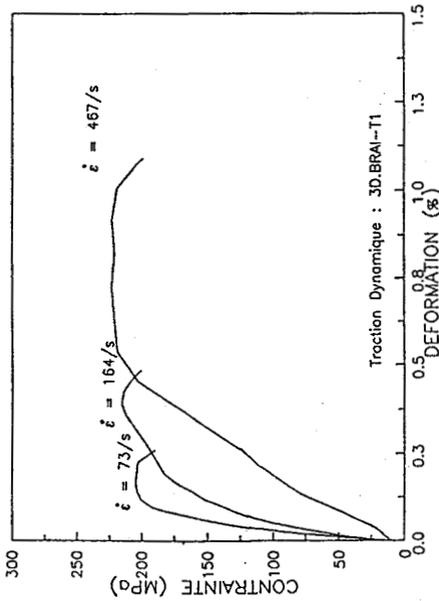


Figure 1 : Courbes "contrainte-déformation" en traction dynamique(T1)

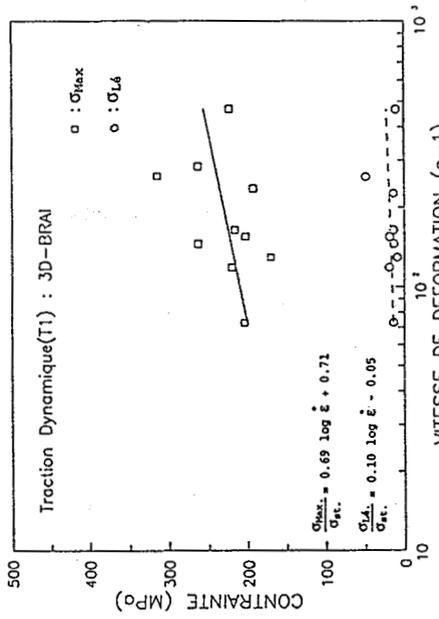


Figure 2 : Influence de la vitesse de déformation sur la contrainte maximale et la contrainte de "limite d'écoulement"(T1)

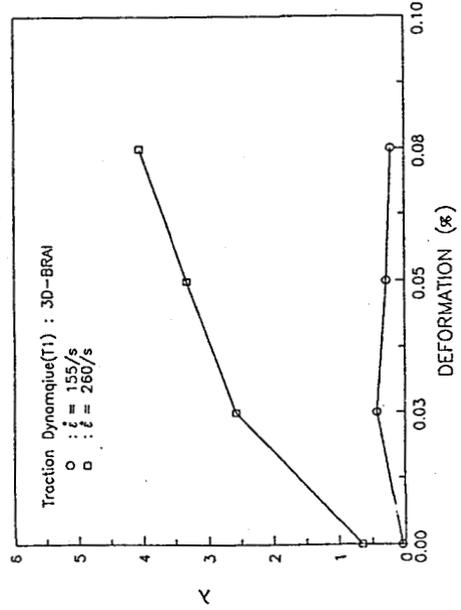


Figure 3 : Coefficient λ de sensibilité évolutive de la contrainte à iso-déformation(T1)

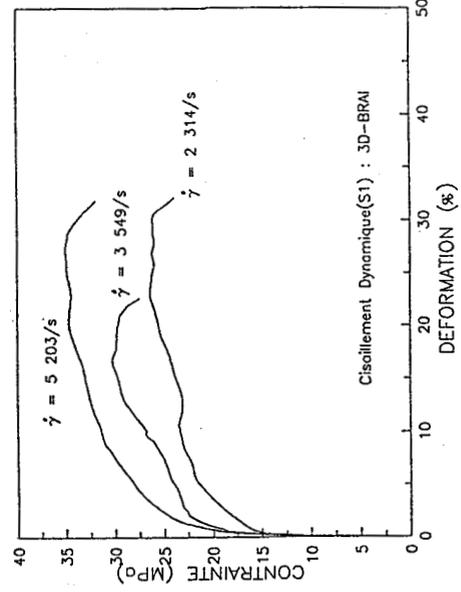


Figure 4 : Courbes "contrainte-déformation" en cisaillement Dynamique(S1)

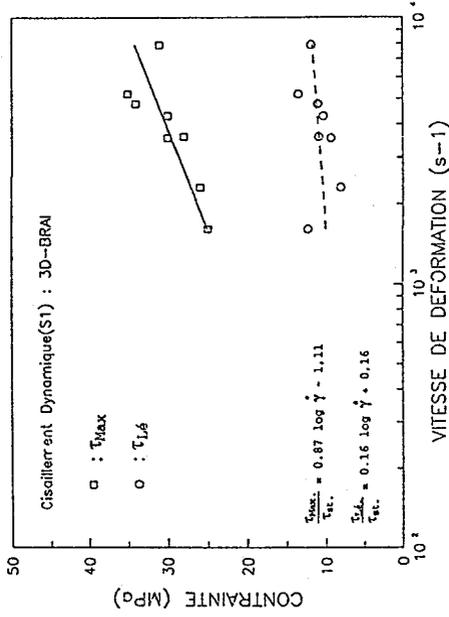


Figure 6 : Influence de la vitesse de déformation sur la contrainte maximale et la contrainte de "limite d'écoulement"(S1)

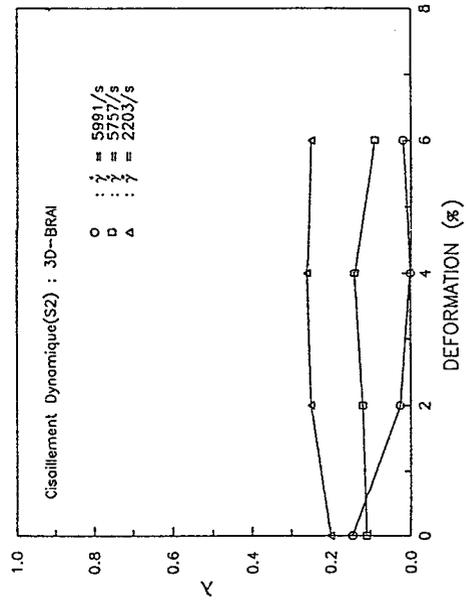


Figure 8 : Coefficient λ de sensibilité évolutive de la contrainte à iso-déformation(S2)

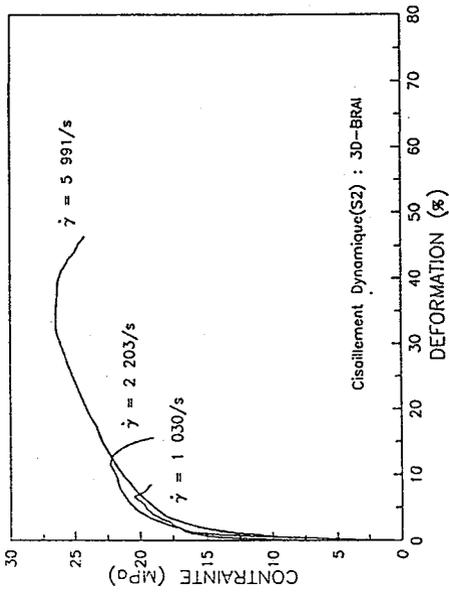


Figure 5 : Courbes "contrainte-déformation" en cisaillement dynamique(S2)

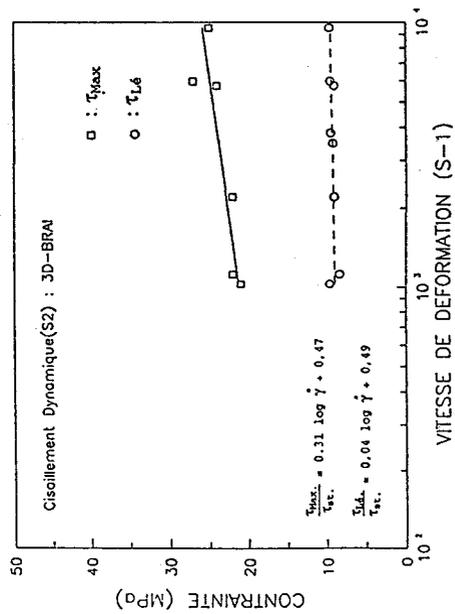


Figure 7 : Influence de vitesse de déformation sur la contrainte maximale et la contrainte de "limite d'écoulement"(S2)

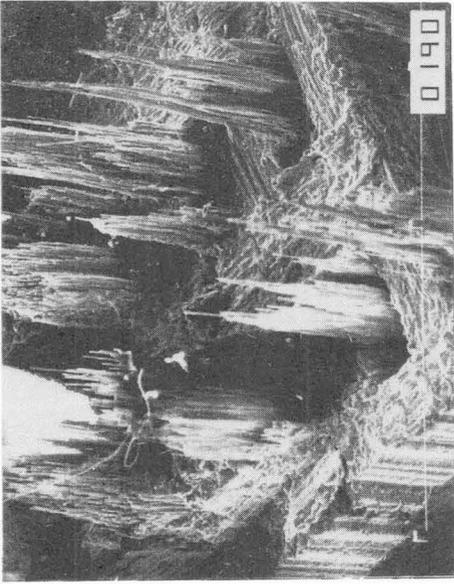


Figure 9 : Phénomène de déchaussement des fibres en traction statique($\dot{\epsilon} = 1.19 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) : 3D-BRAI T1,5 (x 32)

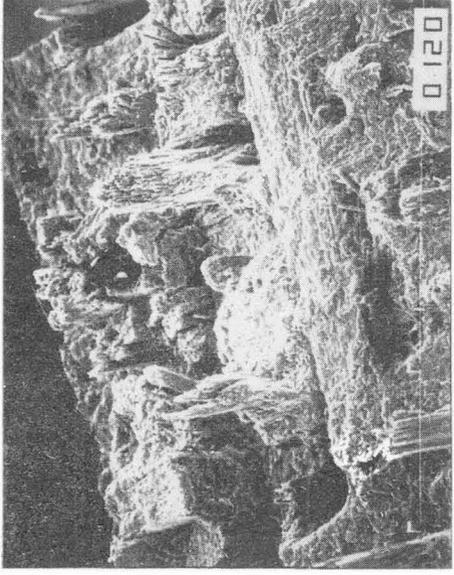


Figure 10 : Diminution de la longueur de déchaussement des fibres en traction dynamique($\dot{\epsilon} = 155 \text{ s}^{-1}$) : 3D-BRAI T1,21 (x 32)

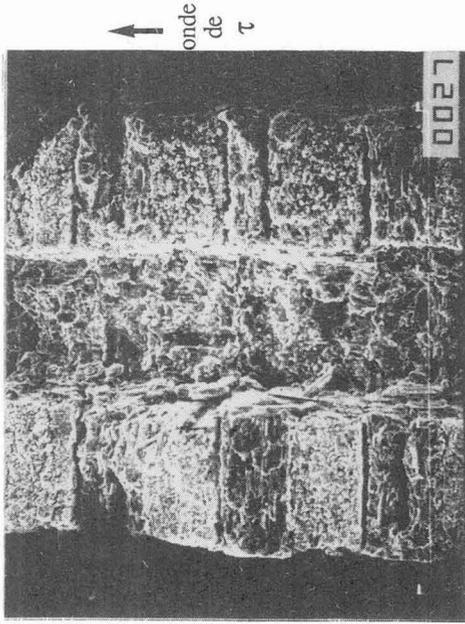


Figure 11 : Faciès de rupture en cisaillement dynamique ($\dot{\gamma} = 4311 \text{ s}^{-1}$) : 3D-BRAI S1,6 (x 33)

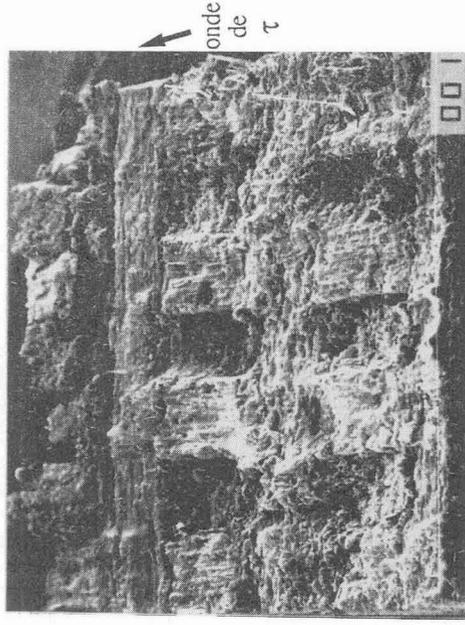


Figure 12 : Faciès de rupture en cisaillement dynamique ($\dot{\gamma} = 5757 \text{ s}^{-1}$) : 3D-BRAI S2,105(x 33)