
CONTRIBUTIONS EXPÉRIMENTALES À LA DÉTERMINATION DES PROFILS DES SURFACES DE RUPTURE PAR SOLLICITATIONS DYNAMIQUES

5.1. Considérations générales

Le chapitre 5 étudie l'influence du traitement thermique pour des éprouvettes Charpy entaillées en U, et qui ont été confectionnées en acier XC 65. Pour ces éprouvettes, il a été appliqué des traitements thermiques différents qui conduisent, soit à un comportement ductile, soit à un comportement fragile après rupture sous sollicitation dynamique.

Les résultats obtenus pour cet acier sont comparés au caractère fractal de la surface de rupture d'une éprouvette Charpy en acier inoxydable 316 L et d'un échantillon de verre de silice (SiO_2), soumis à une sollicitation par impact.

L'observation des faciès de rupture a été effectuée par l'analyse fractographique des surfaces de rupture des éprouvettes Charpy, sous différents grossissements d'un microscope électronique à balayage, et sur des sections perpendiculaires à la surface de rupture, en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage. L'analyse fractale est effectuée sur la base de profils mesurés par les différentes techniques destructives et non destructives.

Nous avons comparé les résultats de l'analyse fractale en fonction des méthodes d'obtention du profil de rupture et de détermination de la dimension fractale. La méthode des îles (Slit Island) [Mandelbrodt B. et al., 1984] s'applique seulement dans le cas des contours de rupture auto-similaires. La méthode de Section Verticale et les techniques non destructives (profilométrie mécanique et interférométrie) s'appliquent, quant à elles, dans le cas des profils de rupture auto-affine.

Les faciès de rupture des éprouvettes Charpy ont été analysés au microscope, immédiatement après le processus de rupture, pour ne pas faire intervenir le phénomène de corrosion de la microstructure du matériau.

Nous avons présenté les dispositifs avec lesquels, nous avons mesuré la rugosité du profil de rupture en fonction du caractère de la rupture. Nous avons implanté deux méthodes d'estimation de la dimension fractale : la méthode du Box Counting et celle de la Transformée de Fourier. La première a été implantée par l'intermédiaire du programme *Image J*. Celle de la Transformée de Fourier a été, par contre, implantée par l'intermédiaire du programme *Origin*.

5.1.1. Les types de matériaux

5.1.1.1. Acier XC 65

Le XC 65 est un acier au carbone pour traitements thermiques, d'après la norme française NF A 35-590. La désignation européenne correspondante est C60E selon la norme NF EN 10132-3. Les autres normes correspondant à ce type d'acier, sont les suivantes : DIN CK60 (Allemagne) et AISI 1065 (U.S.A.). Il est utilisé pour la réalisation de pièces d'usure, de moules pour matière plastique, de ressorts, de butées, d'engrenages, et de cames.

La composition chimique de l'acier XC65 [Norme NF A 35-590, 1992] est la suivante:

C: 0,60 à 0,68%
Mn: 0,50 à 0,80%
Si: 0,10 à 0,40%
Al : 0,015 à 0,035 %
Cr : < 0,20 %
Ni: < 0,20 %
Cu : < 0,30 %
Mo : < 0,06%
P : < 0,035 %
S : < 0,035 %
Sn : < 0,030 %

avec comme caractéristiques mécaniques:

Re > 650 N/mm²
Rm = 900 à 1200 N/mm²
HB=285

5.1.1.2. Acier inox de type X2CrNiMo17-12-2 (316L)

L'acier inox de type X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) représente un acier austénitique, conformément à la norme européenne EN 10250-4. Les standards correspondant à ce type d'acier inox, sont les suivants : AISI 316L (U.S.A.), Z2CND17-12 (France) et DIN X2CrNiMo18-10 (Allemagne). C'est un acier inoxydable utilisé dans les industries chimiques, pharmaceutique, pétrolières, agro-alimentaires, ainsi qu'en milieu nautique, de manière intensive.

La composition chimique de l'acier inox 316L [Norme EN 10250-4, 1999]:

C : < 0.030 %
Si : < 1 %
Mn : < 2 %
P : < 0,045 %
S : < 0,030 %
N : ≤0.11 %
Cr : < 16.50 à 18.50 %
Mo : < 2 à 2.5 %
Ni : 10 à 13 %

avec comme caractéristiques mécaniques, à la température ambiante [Norme EN 10088-3, 1995]:

a) Pour une épaisseur : $d \leq 160$

Dureté HB (estimatif) : <215

Limite d'élasticité 0.2% $R_{p0.2} = 200-235$ N/mm² ;

Résistance à la traction $R_m = 500-700$ N/mm² ;

Allongement A = 40 %

Energie de rupture absorbée par choc KV <100 J

Résistance à la corrosion inter-granulaire : oui à l'état de livraison
oui après traitement de sensibilisation

b) Pour une épaisseur : $160 < d \leq 250$

Dureté HB (estimatif) : >215

Limite d'élasticité 0,2% $R_{p0.2} = 200-235 \text{ N/mm}^2$;

Résistance à la traction $R_m = 500-700 \text{ N/mm}^2$;

Allongement A = 30 %

Energie de rupture absorbée par choc (ISO-V) KV <60 J

Résistance à la corrosion inter-granulaire : oui à l'état de livraison

oui après traitement de sensibilisation

5.1.1.3. Verre de silice SiO_2

La silice SiO_2 est la composante principale du verre. Elle représente approximativement 70% de la masse de celui-ci. Son point de fusion est de 1730 °C. Et plus le pourcentage en SiO_2 est élevé, plus le coefficient de dilatation est faible. Ainsi, le verre est plus résistant.

5.2. Fractographie des surfaces de rupture des matériaux étudiés aux différents traitements thermiques

5.2.1. Fractographie d'un faciès de rupture de l'éprouvette Charpy en acier XC 65 trempé dans l'eau salée (température d'austénitisation : 900°C, temps de maintien : 45 minutes)

L'éprouvette entaillée en U a été trempée dans l'eau salée après austénitisation à 900°C pendant 45 minutes.

La microstructure de la surface de rupture a été suivie au microscope de balayage de type MEB HITACHI S-520, aux grossissements 220x et 350x.

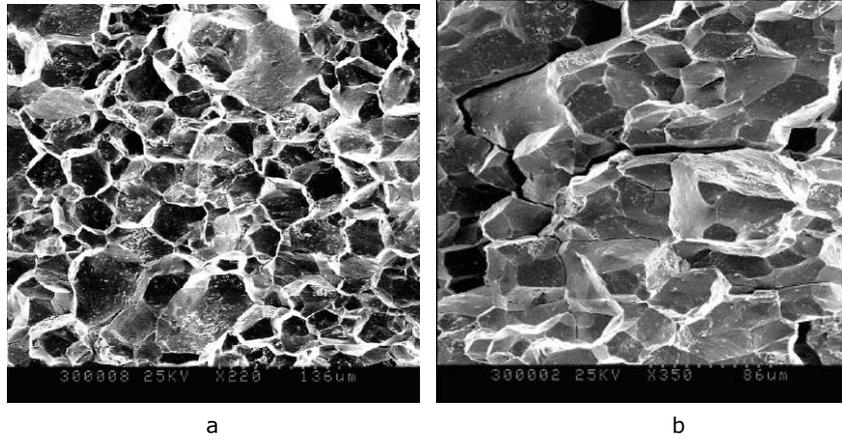


Fig.5.1. L'aspect de la surface de l'éprouvette Charpy en acier XC 65 trempée à l'eau salée (rupture intergranulaire) observée au MEB HITACHI S-520:

a). Grossissement x220, longueur de mesure : 136 μm ;

b). Grossissement x350, longueur de mesure : 86 μm ;

Sur les figures (5.1.a) et (5.1.b) nous pouvons remarquer le fait que la rupture a un caractère fragile. La rupture inter-granulaire a été produite entre deux grains dont la structure, observée par ailleurs en microscopie optique, est martensitique.

5.2.2. Fractographie d'un faciès de rupture de l'éprouvette Charpy en acier XC 65 après trempe et traitement thermique de revenu ($T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=60\text{ min}$) et refroidissement lent à l'air

Dans les conditions thermiques de revenu ($T= 550^{\circ}\text{C}$, $t=60\text{ min}$) et de refroidissement à l'air, la surface de rupture de l'éprouvette en acier XC 65 a un aspect ductile.

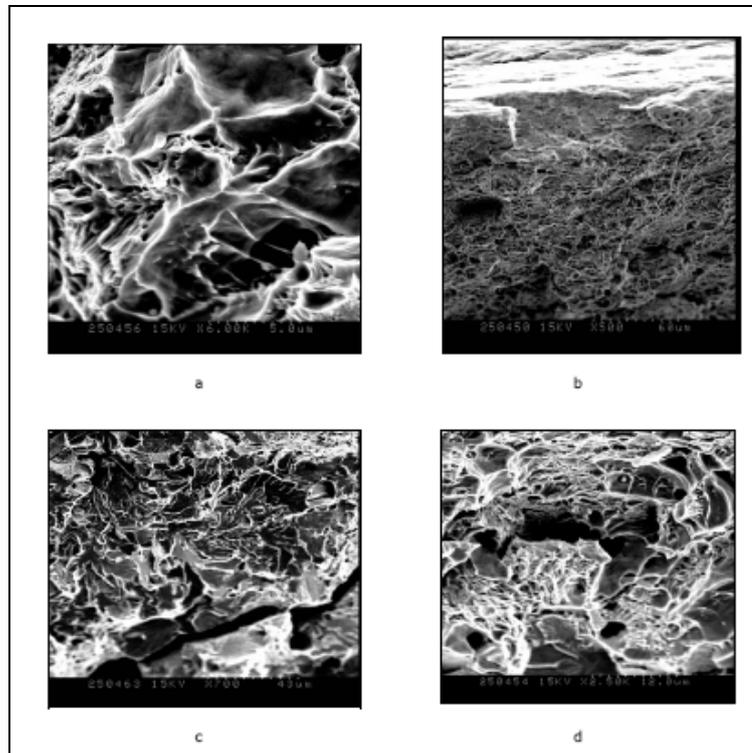


Fig. 5.2. L'aspect de la surface de l'éprouvette Charpy en acier XC65 revenu (rupture ductile), observé au MEB HITACHI S-520:

- a). Grossissement x6000, longueur de mesure : 5 μm ;
- b). Grossissement x500, longueur de mesure : 60 μm ;
- c). Grossissement x700, longueur de mesure : 43 μm ;
- d). Grossissement x2.50K, longueur de mesure : 12 μm

5.3. La fractographie des surfaces de rupture en régime dynamique des matériaux testés à la température ambiante

Les éprouvettes Charpy testées à la température ambiante, ont été confectionnées en acier inox 316L et acier XC 65 non traité thermiquement. Suite à l'impact, une fragilité a été décelée sur l'échantillon en verre rompu.

5.3.1. La fractographie d'un faciès de rupture de l'éprouvette Charpy en acier inox 316L

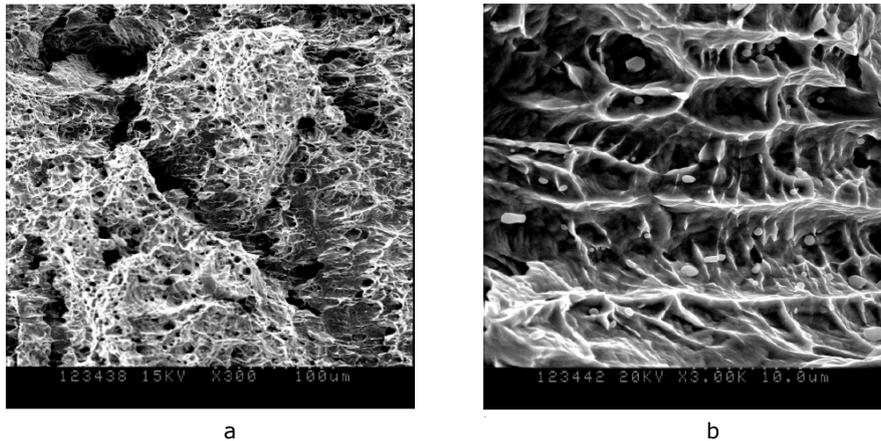


Fig.5.3. La microfractographie des surfaces de rupture dans le cas de l'éprouvette en acier inox 316L (rupture ductile) observée au MEB HITACHI S-520 :

- a). Grossissement x300, longueur de mesure : 100 µm;
- b). Grossissement x3000, longueur de mesure : 10 µm;

Sur la figure (5.3.) nous pouvons remarquer le caractère ductile de la surface de rupture, avec des déformations plastiques importantes et des cupules. Avec un grossissement plus important, nous pouvons observer sur la figure (5.3.b) les cupules et les impuretés qui ont favorisé la rupture dans la zone de rupture ductile d'une éprouvette en acier inox 316L.

5.3.2. La fractographie d'un faciès de rupture d'un échantillon en verre

Le verre est un matériau fragile se fissurant seulement dans le 1er mode.

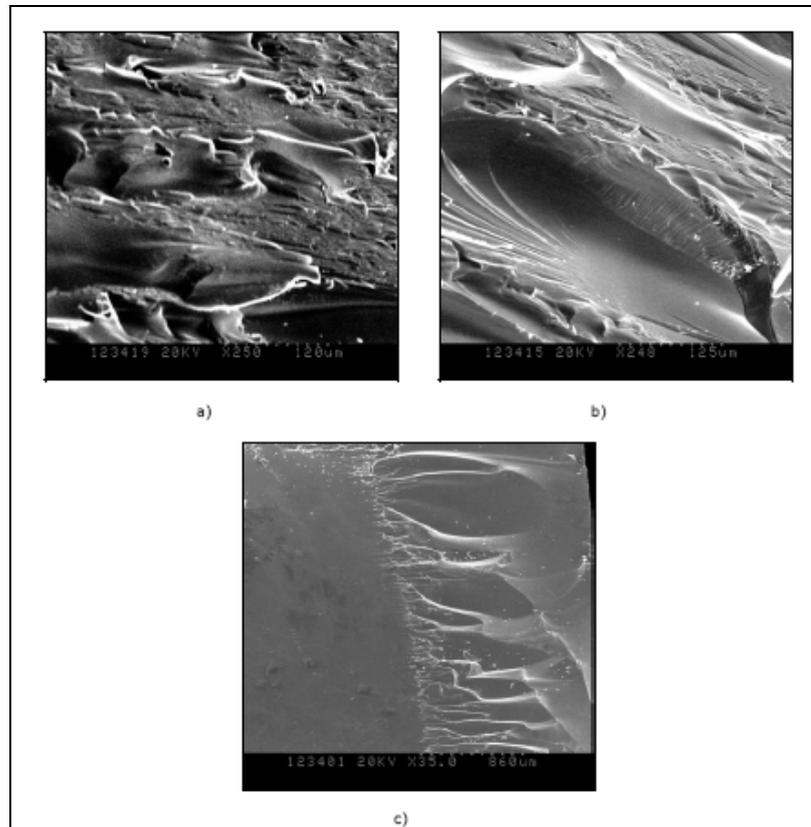


Fig.5.4. Microfractographie des surfaces de rupture pour verre (rupture fragile) observée au MEB HITACHI S-520 :

- a). Grossissement x250, longueur de mesure : 120 µm;
- b). Grossissement x248, longueur de mesure : 125 µm;
- c). Grossissement x35, longueur de mesure : 860 µm

L'origine de la rupture est sur la partie concave des lignes de Wallner et ces lignes s'utilisent pour la détermination de la direction de propagation et le positionnement de l'origine de la fissure.

Ces lignes, dénommées selon le nom du chercheur qui a expliqué leur formation, sont situées sur la surface de rupture et sont causées par le dérangement du front de la surface de rupture par des ondes sonores.

Le phénomène est semblable à celui qui consiste à jeter une pierre dans l'eau.

5.3.3. La fractographie d'un faciès de rupture de l'éprouvette Charpy en acier XC 65 non traité thermiquement

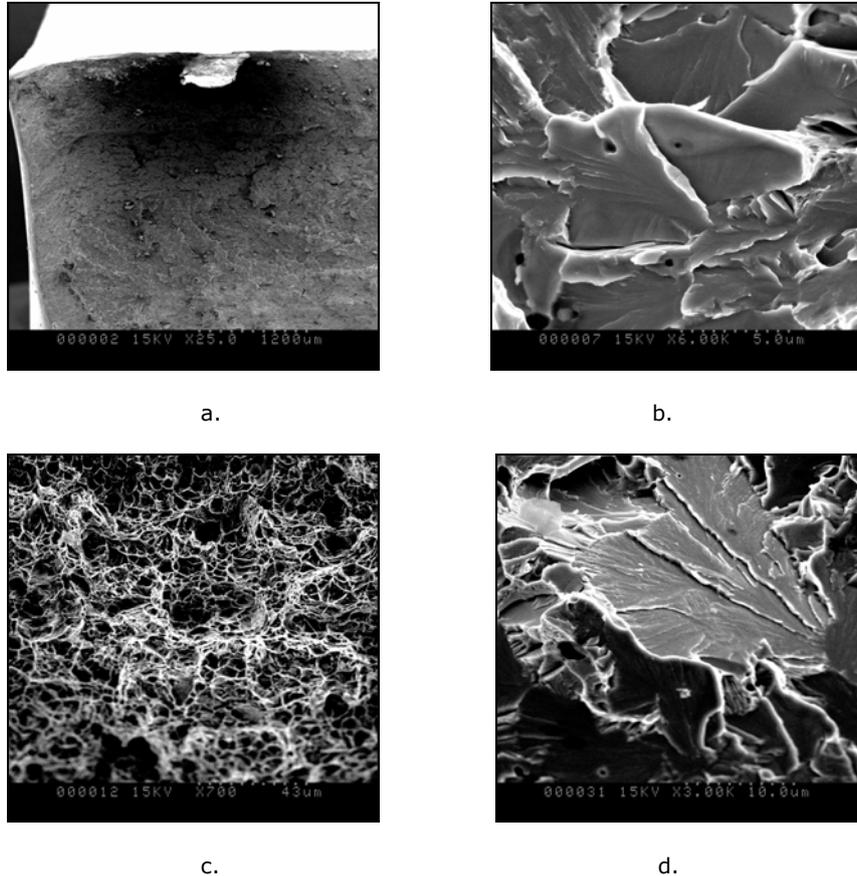


Fig. 5.5. Microfractographie des surfaces de rupture pour l'acier XC65 non traité thermiquement (rupture mixte), observée au MEB HITACHI S-520:

- a) Aspect mixte, Grossissement x25, longueur de mesure : 1200 μm ;
- b) Aspect fragile, Grossissement x6000, longueur de mesure : 5 μm ;
- c) Aspect ductile, Grossissement x700, longueur de mesure: 43 μm ;
- d) Aspect fragile, Grossissement x3000, longueur de mesure: 10 μm .

Nous pouvons remarquer l'existence de deux zones fragiles au centre de la pièce et autour de cette zone, une région ductile est visible. Ces zones fragiles sont caractérisées par la présence de clivages et de rivières. Le fait que la rupture fragile soit au centre de l'éprouvette, est en accord avec la triaxialité des contraintes plus importantes vers la surface de la pièce; ce qui correspond à une rupture ductile.

5.4. Méthodes et moyens expérimentaux utilisés pour l'investigation des profils de rupture des éprouvettes Charpy

Pour la détermination du profil de rupture des éprouvettes Charpy, deux techniques distinctes sont utilisées : la méthode de Section Verticale et la méthode des îles, ainsi que techniques non destructives, comme la méthode du palpement mécanique (par l'intermédiaire du profilomètre mécanique *KLA-Tencor P-10*) et la méthode du palpement optique (par l'intermédiaire du profilomètre optique *Wyko NT9300*).

Les profils de rupture résultants, suite aux mesures effectuées à l'aide de la profilométrie mécanique ou profilométrie optique (l'interférométrie) ont pu être déterminés par l'intermédiaire du programme Mountains Profile, conçu par la compagnie *Digital Surf* de Besançon, France.

5.4.1. Les moyens expérimentaux utilisés pour l'étude du profil de rupture des éprouvettes Charpy

5.4.1.1. Profilométrie mécanique

Récemment, plusieurs auteurs ont utilisé la technique de la profilométrie mécanique pour l'étude des profils de rupture qui présentent un caractère fractal et pour l'analyse de la rugosité des surfaces [Russ J.C., 1994], [Bigerelle M. et al., 2007], [Gautier A. et al., 2007].

Le dispositif utilisé pour les recherches expérimentales est le profilomètre *KLA-Tencor P-10*. Celui-ci est composé par une pointe de stylet en diamant, un capteur qui se déplace sur l'axe z, et deux plaques de montage qui traduisent les axes x et y.

La force appliquée par le stylet sur la surface est inférieure à 50 mN, afin de préserver l'intégrité de la surface. Après chaque mesure, les surfaces ont été vérifiées, et aucun dommage n'a été observé.

Les résolutions sont différentes pour les axes x, y et l'axe z : 0,075 nm pour l'axe z et 0,2 µm pour les axes x et y. La résolution latérale est limitée par le rayon de la pointe du stylet (2 µm).

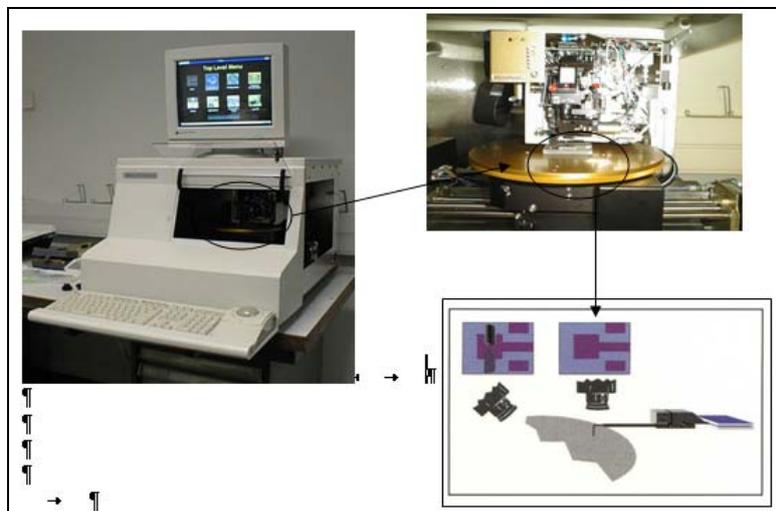


Fig.5.6. Profilomètre tactile KLA-Tencor P-10

Pour les éprouvettes Charpy qui présentent une rupture ductile, il est recommandé de mesurer le profil des surfaces de rupture à l'aide du microscope interférométrique.

5.4.1.2. Interférométrie Wyko NT 9300

Nos recherches ont été réalisées sur un profilomètre optique *Wyko NT 9300* produit par l'entreprise *Veeco*. Le dispositif *Wyko NT 9300* utilise le logiciel *Vision* qui calcule quelques paramètres de surface en donnant des informations sur la rugosité et le profil de la surface. Ce logiciel est connecté à *Matlab* et permet le choix de l'intensité lumineuse pour obtenir la focalisation correspondante et pour l'enregistrement des mesures.

L'interférométrie est basée sur le déphasage des radiations lumineuses. Les informations concernant le contour d'un objet sont toujours comprises dans la phase d'une onde lumineuse réfléchie par l'objet. Si deux faisceaux lumineux d'une radiation cohérente parcourent des distances différentes et ultérieurement interfèrent, il apparaît des franges d'interférence.

L'information concernant la phase est transformée par le mécanisme d'interférence de deux ondes, en variation d'intensité lumineuse. Cette méthode est destinée à mesurer la rugosité, sans le contact de la surface.

Ce microscope interférométrique permet d'effectuer les observations avec trois objectifs : x5, x20 et x50 pour caractériser la topographie de la surface.

L'objectif x5 présente les caractéristiques suivantes:

- distance de travail : 6,7 mm
- résolution optique : $2,5 \mu\text{m}^3$
- champ de vision: $1,27 \times 0,95 \text{ mm} \times \text{mm}^5$

L'objectif x20 présente les caractéristiques suivantes:

- distance de travail : 4,7 mm
- résolution optique : $0,75 \mu\text{m}^3$
- champ de vision: $0,32 \times 0,24 \text{ mm} \times \text{mm}^5$

L'objectif x50 présente les caractéristiques suivantes:

- distance de travail : 3,4 mm
- résolution optique : $0,55 \mu\text{m}^3$
- champ de vision: $0,13 \times 0,10 \text{ mm} \times \text{mm}^5$

Le dispositif Wyko NT 9300 utilise le programme Vision pour enregistrer les mesures. Ceci fonctionne sous Matlab.

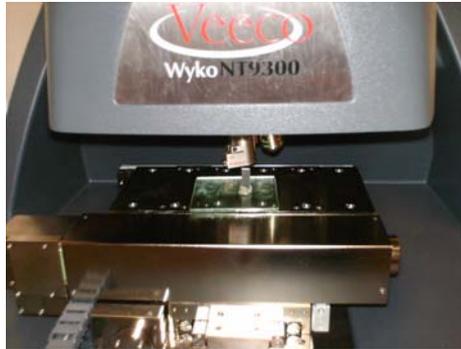


Fig. 5.7. Le dispositif Wyko NT9300

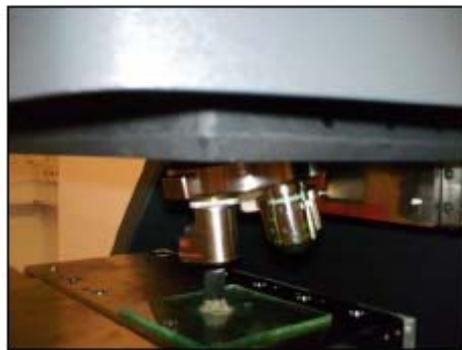


Fig. 5.8. L'éprouvette Charpy analysée au microscope interférométrique (objectif 5x)

Le système de mesure *Wyko NT 9300* est basé sur deux modes de mesure standard : PSI et VSI. Le mode VSI comporte un filtre de densité neutre pour des lumières blanches. La longueur de mesure maximale, dans ce cas, est de 10 mm. Le mode de mesure utilisé pour les faciès de rupture des éprouvettes Charpy qui comportent des rugosités plus élevées et celles comportant une différence supérieure à

un quart de longueur d'onde utilisée ($\lambda/4$) est le mode VSI (vertical scanning interferometry). La longueur maximale de mesure pour ce mode est de 10 mm.

Si on utilise le mode PSI pour mesurer des surfaces avec des variations importantes de rugosité entre les pixels adjacents, le programme ne peut intégrer les données de phase pour reconstruire le front d'onde mesuré. Les changements abrupts de hauteur de la surface sont des erreurs d'intégration. Le mode de scannage PSI (Phase-Shifting Interferometry) produit la lumière rouge qui représente une lumière filtrée sur une portion étroite. Ce mode est très précis pour les surfaces de rupture planes.

Le filtre *PSI High Mag* peut être utilisé pour des mesures sous le mode VSI, trois fois plus grandes que la vitesse de scannage.

Pour éviter les erreurs d'intégration, il faut utiliser le mode VSI, si les changements de hauteur sont plus abrupts pour une résolution sous le mode PSI.

Tab.5.1. La résolution verticale du dispositif Wyko NT 9300

Le mode	La résolution verticale	
	une seule mesure	mesures multiples (moyens)
PSI	3 Å	1 Å
VSI	3 nm	< 1 nm

Nous pouvons déduire du tableau (5.1.), que la meilleure résolution s'obtient, quand on fait la moyenne des mesures moyennes en mode VSI.

5.4.1.2.1. Avantages et limites des mesures effectuées par interférométrie

Les mesures effectuées par l'intermédiaire du microscope interférométrique représentent de véritables mesures 3D. Le procédé s'applique aisément dans le cas de surfaces planes.

Dans le cas des pièces à aspérités importantes (pentes importantes dans le profil de rugosité) il existera des points non mesurables.

Cette méthode peut être plus rapide, en comparaison avec d'autres techniques de mesure du profil de rupture, dans le cas où la surface entière peut être mesurée en une seule fois, avec une précision latérale correspondante à la résolution d'un microscope classique ou plus grande que 1 μm .

Les changements de la puissance de réflexion de la surface sont dus aux changements dans la composition du matériau de la pièce à analyser, ou aux problèmes de scannage locale.

Toutefois, la plus grande difficulté résulte des variations dans l'altitude des surfaces de rupture des éprouvettes Charpy; celles-ci ne pouvant réfléchir la lumière dans l'oculaire du microscope interférométrique.

5.4.2. Contributions concernant l'application de l'analyse fractale dans le cas des contours des profils de rupture obtenus par la méthode de Section Verticale

Le profil de la surface de rupture est généré par l'intersection du plan de section avec la surface de rupture [A.M.Gokhale, 1987]. Du point de vue expérimental, cette méthode a été appliquée en sectionnant l'éprouvette perpendiculairement avec le plan de la surface de rupture, à l'aide d'une scie circulaire ($v=3500$ tr/min), en produisant des sections verticales.

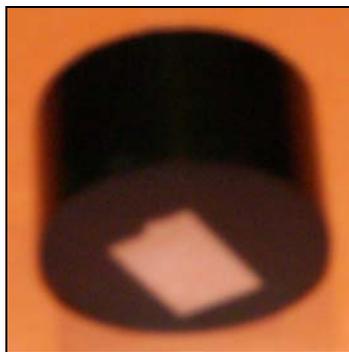


Fig. 5.9. L'échantillon Charpy enrobé en résine suite à l'application de la technique de Section Verticale

L'opération de coupe de l'échantillon a été effectuée par l'intermédiaire de la machine de tronçonnage sous jet d'eau *Discotom*, à l'aide d'un disque de diamant de dimensions $235 \times 3 \times 32$ [mm], destiné aux aciers durs. La vitesse de rotation de la meule est de 3500 tr/min.

Cette opération est effectuée avec précaution (faible vitesse d'avancement, arosage important), de façon à minimiser au maximum, l'élévation de température et les contraintes résiduelles en surface. La portion sectionnée qui contient le profil de la surface de rupture va être enrobée à chaud dans de la résine et ensuite observée au microscope optique. Après l'enrobage, l'échantillon doit être poli et attaqué métallographiquement en vue de l'analyse du profil de rupture au microscope optique métallographique.



Fig. 5.10. Scie mécanique utilisée pour l'opération de coupe de l'échantillon en vue de l'application de la Méthode de Section Verticale



Fig. 5.11. Machine de polissage *Knuth-Rotor*

Le polissage a été exécuté mécaniquement sous jet d'eau à l'aide de la polisseuse *Knuth-Rotor* et de papiers métallographiques à particules abrasives en carbure de silicium (SiC). Au polissage, nous avons successivement utilisé des papiers 80, 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400 et 4000. Le chiffre indiqué correspond au nombre de grains de carbure de silicium par unité de surface. Pour le papier 80, le diamètre moyen des grains est de 200 μm ; et pour le papier 4000, ce diamètre est de 5 μm . Entre chaque passage d'un papier à un autre de granulation plus fine, l'échantillon est tourné de 90°, et on vérifie que toutes les rayures obtenues à l'aide du papier précédent sont enlevées.

Les échantillons sont ensuite lavés et dégraissés à l'acétone, par passage dans une cuve à ultrasons, puis séchés dans un courant d'air chaud.

L'attaque métallographique a été réalisée par l'immersion dans du *Nital* (5% HNO₃ et alcool éthylique), substance réactive qui permet de révéler la structure, avant de rincer l'échantillon à l'alcool, le sécher et ensuite l'examiner au microscope optique.

La méthode de Section Verticale a été appliquée, d'abord sur une éprouvette en acier XC 65, selon un traitement thermique par trempe et sur un échantillon en acier inox 316L.

a). Echantillon en acier XC65, traitement thermique de trempe

On a estimé la dimension fractale sous la base de l'algorithme du Box Counting par l'intermédiaire du programme *Image J*.



Fig.5.12. Contour du profil obtenu par la méthode de Section Verticale sur l'éprouvette en acier XC 65, après traitement thermique de trempé, (grossissement 400x)

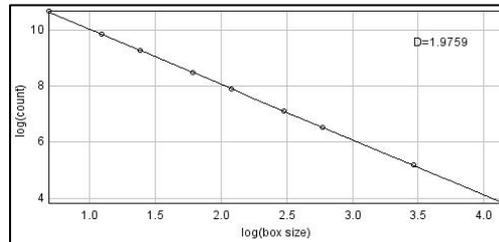


Fig.5.13. Calcul de la dimension fractale du profil de rupture $\Delta=1,97$ avec le programme Image J

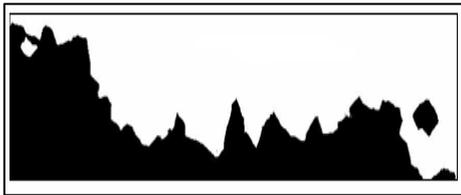


Fig.5.14. Contour du profil obtenu par la méthode de Section Verticale sur l'éprouvette en acier XC 65, après traitement thermique de trempé, (grossissement 200x)

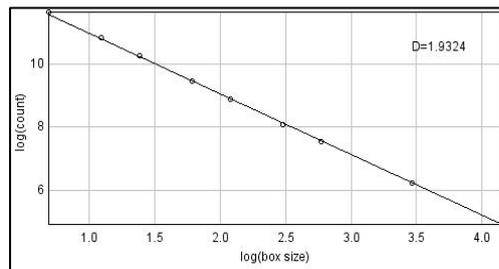


Fig.5.15. Calcul de la dimension fractale du profil de rupture : $\Delta=1,93$ avec le programme Image J

Les pentes des diagrammes de figures (5.13.) et (5.15.) représentent la dimension fractale de la rugosité du profil. Nous pouvons remarquer le bon alignement des points. Ainsi, la dimension fractale est validée sur la longueur d'évaluation, le fort caractère fractal ($\Delta=1,97$ et $\Delta=1,93$) est dû à l'aspect fragile de la surface de rupture de l'échantillon en XC 65 trempé.

b). Echantillon en acier inox 316L

Fig. 5.16. Contour du profil obtenu par la méthode de Section Verticale sur l'éprouvette en acier inox 316L, (grossissement 50X)

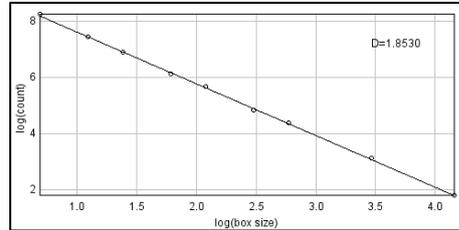


Fig. 5.17. Calcul de la dimension fractale du profil de rupture : $\Delta = 1,85$ avec le programme Image J



Fig. 5.18. Contour du profil obtenu par la méthode de Section Verticale sur l'éprouvette en acier inox 316L, (grossissement 100X)

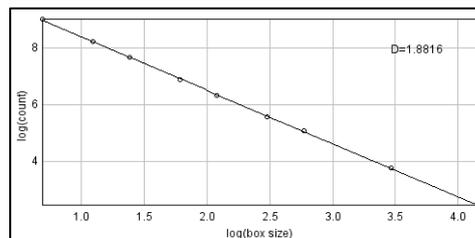


Fig. 5.19. Calcul de la dimension fractale du profil de rupture : $\Delta = 1,88$ avec le programme Image J

Mandelbrot mentionnait que les surfaces verticales d'un relief ne sont pas isotropes [Mandelbrot, 1985]. On pourra associer cette idée avec les surfaces obtenues suite à l'application de la méthode de Section Verticale. Les contours des surfaces de rupture ainsi obtenues représentent des courbes fractales auto affines.

5.4.2.1. Les avantages et les inconvénients de l'application de la méthode de Section Verticale

La méthode de Section Verticale nécessite beaucoup du temps pour être mise en pratique, et la résolution de la camera digitale n'a pas une valeur assez grande.

Un avantage important de cette technique métallographique est, cependant, que le profil de rupture et la microstructure fondamentale peuvent être observés simultanément, et que par ailleurs, le contour de rupture peut être corrélé à la microstructure.

5.4.3. Contributions concernant l'application de l'analyse fractale dans le cas du contour des profils de rupture obtenus par la méthode des îles (Slit Island)

L'échantillon en acier XC 65 non traité thermiquement a été enrobé dans de la résine et ensuite sectionné parallèlement à la surface de rupture. Les îles ont pu être mis en évidence après l'opération de polissage à l'aide de la microscopie optique.

Après avoir observé la première insertion du matériau en résine, on a arrêté le polissage. On a, ensuite, poli avec des disques en papier recouverts d'abrasif SiC 800 et SiC 4000. Pour la détermination de la dimension fractale, on a utilisé l'algorithme du Box Counting du programme *Image J*.

L'image observée à la microscopie optique a pu être transformée par le programme *Image J* en une image digitalisée de taille 376X282 pixels (8 bits). La méthode de Box Counting est la technique la plus fiable d'estimation de la dimension fractale, dans le cas de l'application de la technique métallographique Slit Island.

On a calculé la dimension fractale moyenne du contour des îles sur 20 photos.

5.4.3.1. La méthode des îles appliquée à l'éprouvette en acier XC 65 non traitée thermiquement. Le résultat du polissage avec du papier abrasif 800

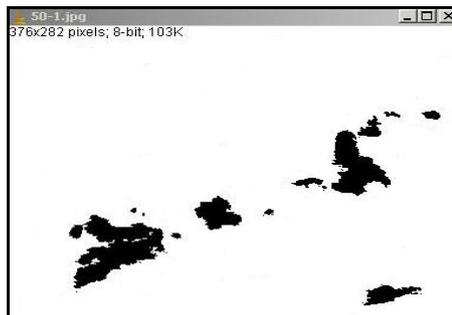


Fig. 5.20. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 50x)

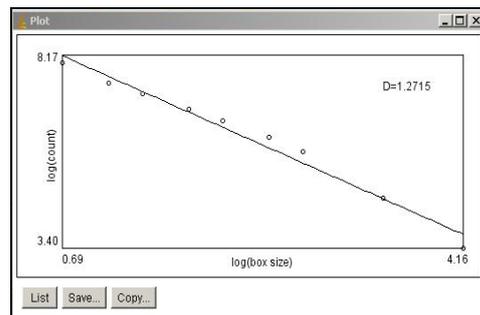


Fig. 5.21. Dimension fractale obtenue dans le programme *Image J* : $\Delta=1,27$

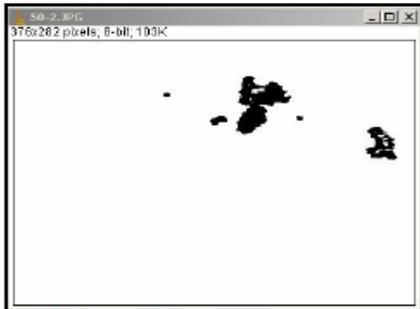


Fig. 5.22. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 50x)

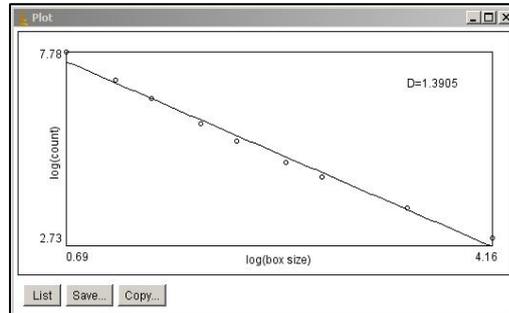


Fig. 5.23. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,39$

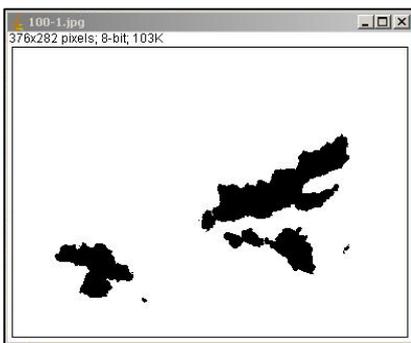


Fig. 5.24. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

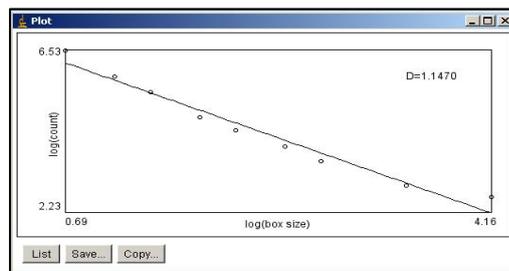


Fig. 5.25. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,14$

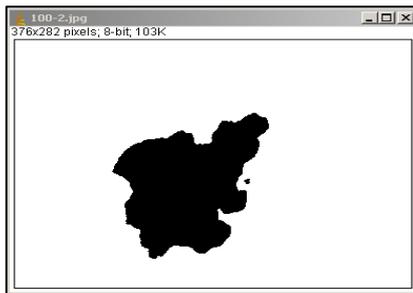


Fig. 5.26. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

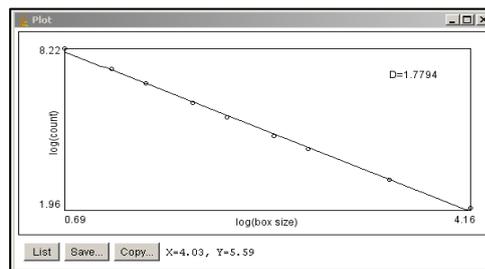


Fig. 5.27. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,77$

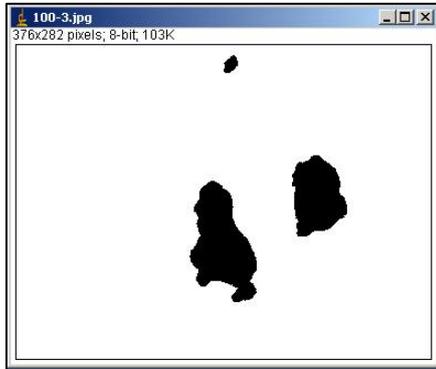


Fig. 5.28. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

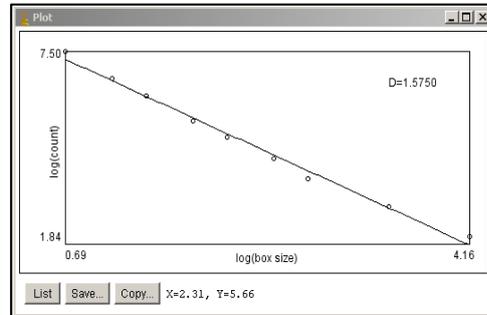


Fig. 5.29. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,57$

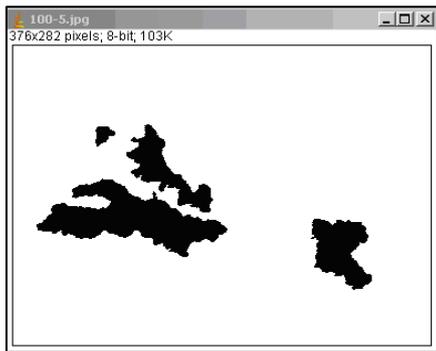


Fig. 5.30. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

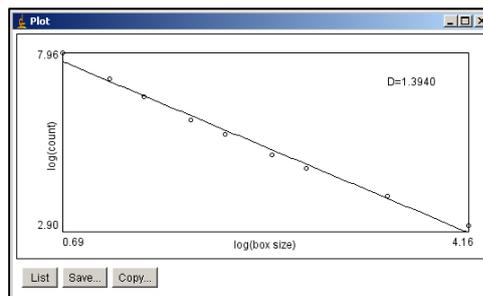


Fig. 5.31. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,39$

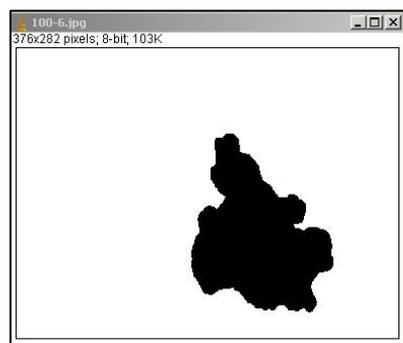


Fig. 5.32. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

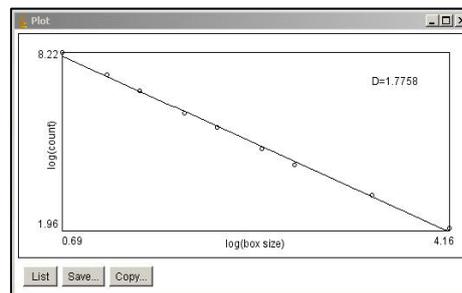


Fig. 5.33. Dimension fractale obtenue dans le programme *Image J* : $\Delta=1,77$

Dans les figures (5.26.) et (5.32.) il est observé une seule île de contour différente, obtenue dans les mêmes conditions (par polissage avec disque abrasif 800, grossissement 100x), pour lesquels, on a obtenu la même valeur $\Delta=1,77$, pour la dimension fractale.

Observation:

Au début du polissage avec disque abrasif 800, nous avons observé au grossissement 50x des îles de petite taille, avec des dimensions fractales petites:

- $\Delta=1,14$ dans le cas de la figure 5.24 ;
- $\Delta=1,27$ dans le cas de la figure 5.20 ;
- $\Delta=1,39$ dans le cas de la figure 5.22.

Au grossissement 100x, nous avons observé une seule île de dimension fractale $\Delta=1,77$.

La dimension fractale représente ici un paramètre unique de la forme d'un objet.

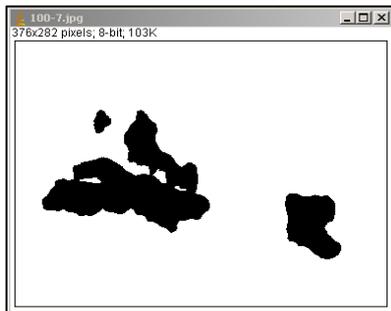


Fig.5.34. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

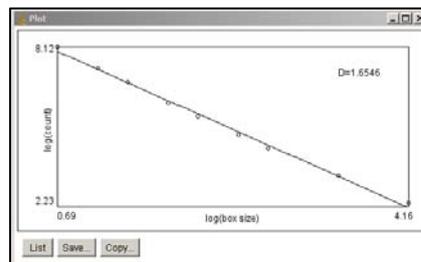


Fig.5.35. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,65$

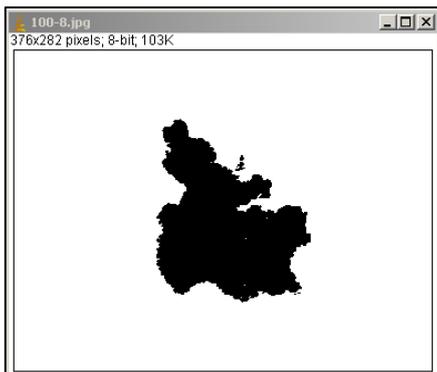


Fig.5.36. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 100x)

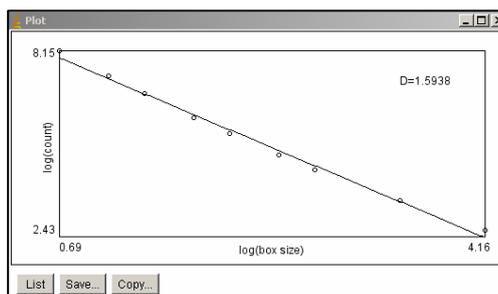


Fig.5.37. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,59$

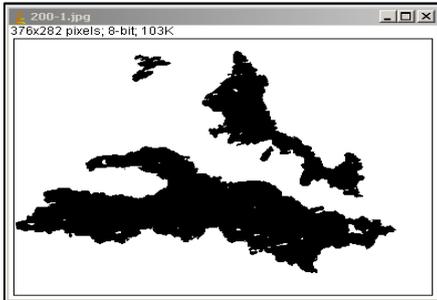


Fig.5.38. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 200x)

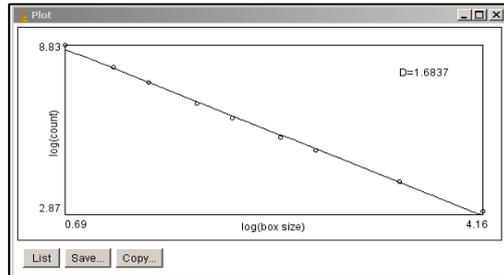


Fig.5.39. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,68$

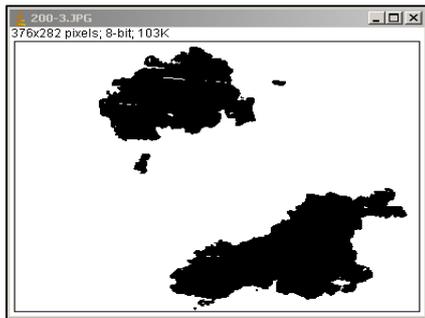


Fig.5.40. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 200x)

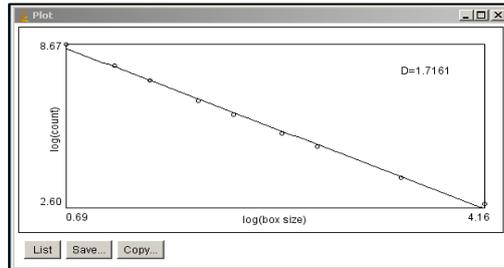


Fig.5.41. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,71$

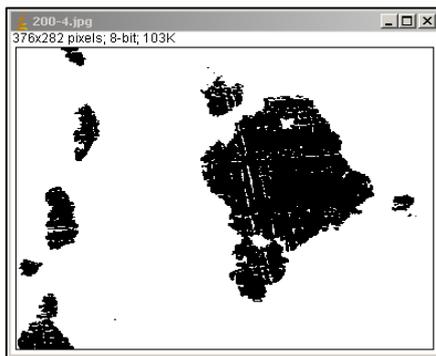


Fig.5.42. Polissage avec disque abrasif 800, (grossissement 200x)

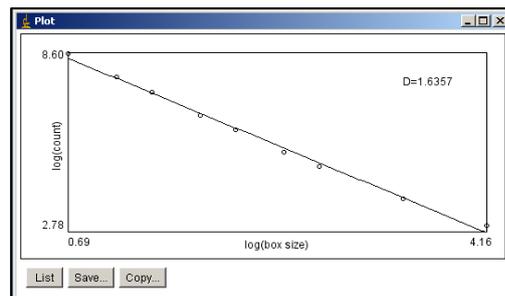


Fig.5.43. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,63$

La dimension fractale moyenne dans le cas du polissage avec disque abrasif 800 est $\Delta = 1,53. \pm 0,19$.

Observation: l'écart type a été calculé à l'aide de la fonction *STDEV* du programme EXCEL.

5.4.3.2. La méthode des îles appliquée à l'éprouvette en acier XC 65 non traité thermiquement. Le résultat du polissage avec du papier abrasif 4000

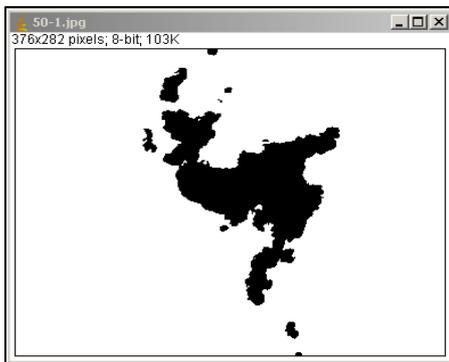


Fig.5.44. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 50x)

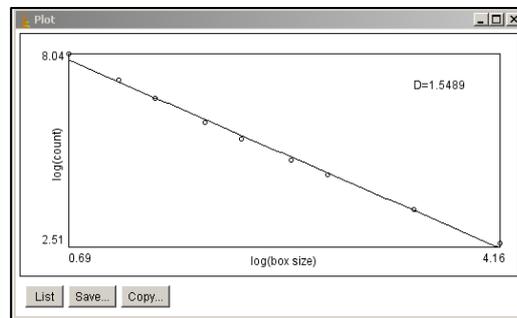


Fig.5.45. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta = 1,54$

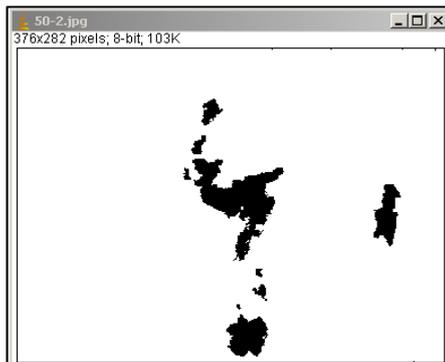


Fig.5.46. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 50x)

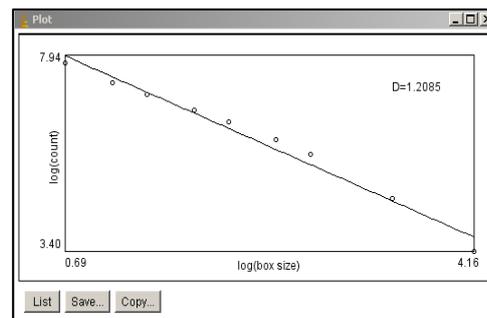


Fig.5.47. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta = 1,20$

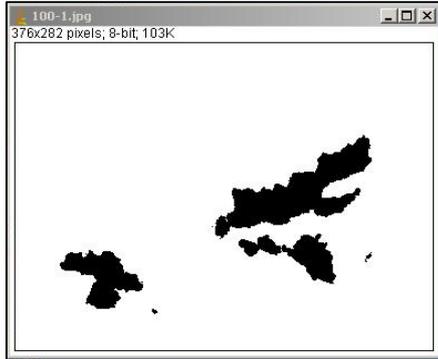


Fig.5.48. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 100x)

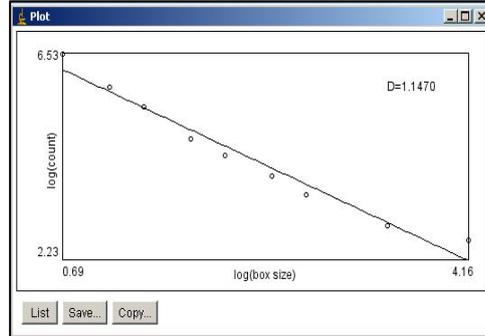


Fig.5.49. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta = 1,14$

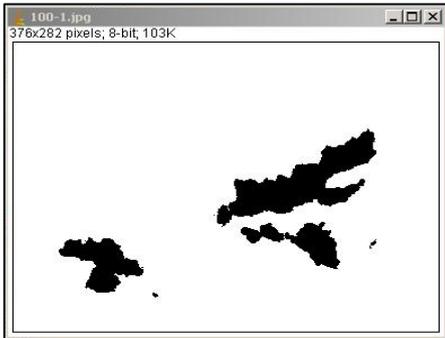


Fig.5.50. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 100x)

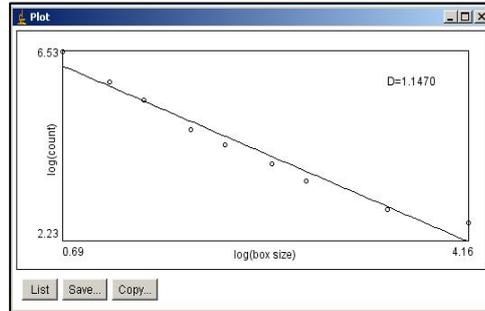


Fig. 5.51. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,53$

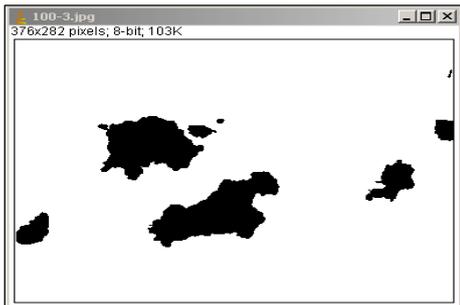


Fig. 5.52. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 100x)

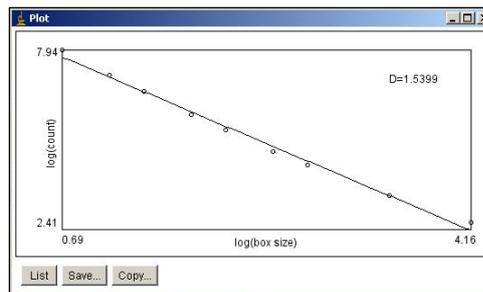


Fig. 5.53. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta=1,53$

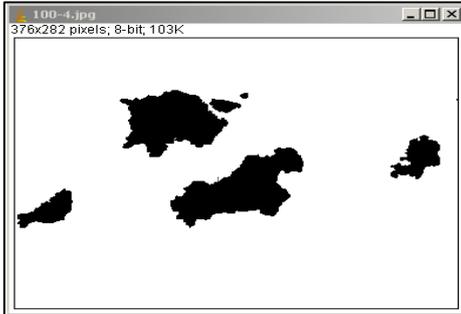


Fig. 5.54. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 100x)

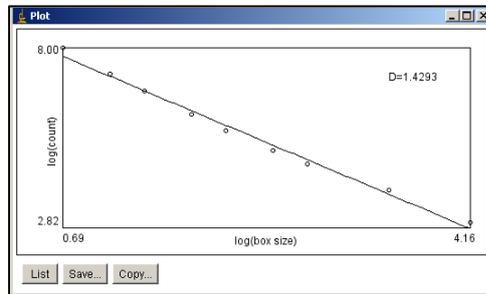


Fig. 5.55. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta = 1,42$

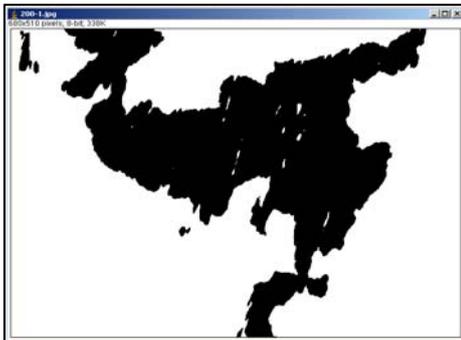


Fig. 5.56. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 200x)

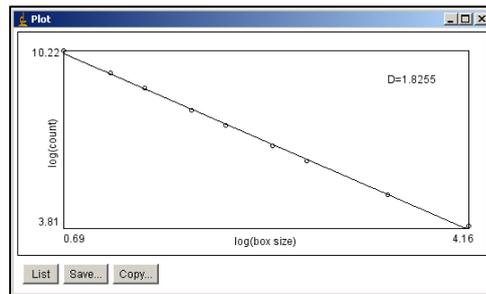


Fig. 5.57. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : $\Delta = 1,82$

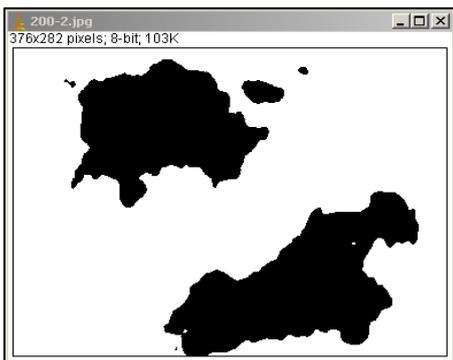


Fig. 5.58. Polissage avec disque abrasif 4000, (grossissement 200x)

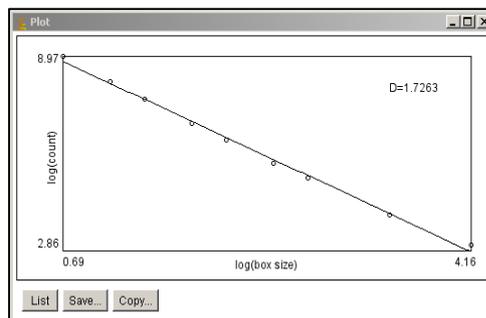


Fig. 5.59. Dimension fractale obtenue par le programme *Image J* : 1,72

La dimension fractale moyenne dans le cas du polissage avec un disque abrasif 4000 est $\Delta = 1,54. \pm 0,21$.

Observation: l'écart type a été calculé à l'aide de la fonction STDEV du program EXCEL.

Nous pouvons remarquer que, l'augmentation du grossissement améliore la résolution de la mesure, mais n'a pas d'effet net sur la mesure de la dimension fractale.

Il n'y a pas de différence entre les résultats obtenus sur les échantillons polis avec les papiers 800 et 4000, malgré le fait que le contour soit plus net, lorsque le polissage est effectué avec le 4000. Ainsi, la dimension fractale moyenne dans le cas du polissage avec un disque abrasif 800, est $\Delta = 1,53 \pm 0,19$. Elle est de $\Delta = 1,54 \pm 0,21$, pour du papier 4000.

5.5. Contributions à l'application de la profilométrie mécanique pour la détermination des dimensions fractales des surfaces de rupture dans le cas des éprouvettes Charpy

Nous avons effectué une analyse fractale sur les profils de rupture obtenus dans le cas des surfaces de rupture fragiles, à l'aide de la profilométrie mécanique.

5.5.1. Résultats des mesures pour l'échantillon en acier XC 65, austénitisé et trempé à l'eau

Pour obtenir le profil de rupture de l'échantillon Charpy en acier XC 65, suite au traitement de trempe, on a utilisé le profilomètre *Tencor P10*, avec les paramètres suivants : longueur de palpage : 2000 μm , vitesse de scannage : 100 $\mu\text{m/s}$ et la charge appliquée: 5 mg. La grandeur de la surface mesurée a été de 2 mm x 2 mm (1000 pixels x 1000 pixels).

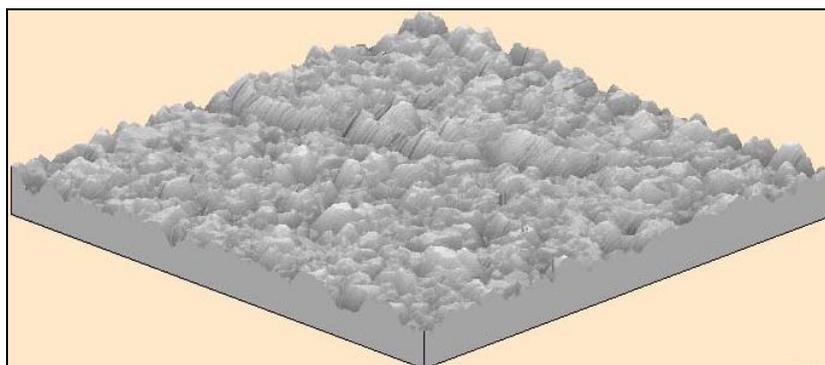


Fig. 5.60. Représentation 3D de la surface de l'échantillon en acier XC65 à l'aide du profilomètre tactile *Tencor P10*

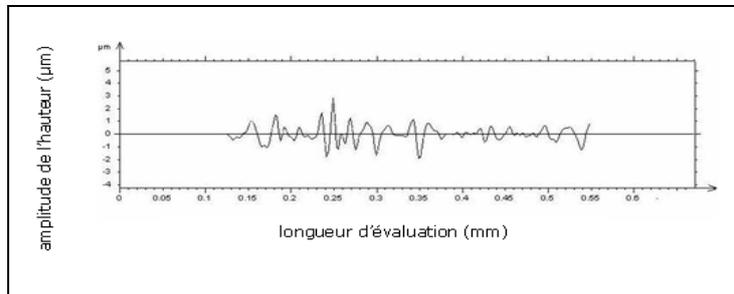


Fig. 5.61. Profil de rugosité de la surface de rupture pour l'échantillon en acier XC 65; traitement thermique de trempé

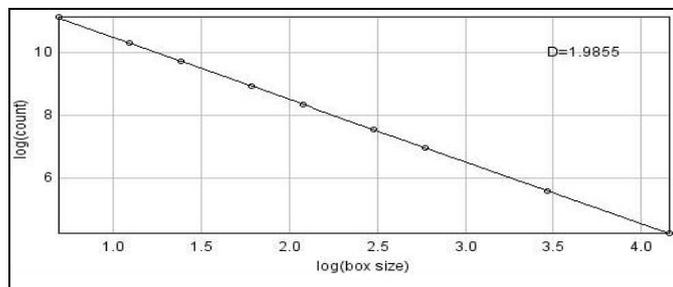


Fig. 5.62. Dimension fractale du profil de rugosité de la surface de rupture dans le programme *Image J* : $\Delta=1,98$

La pente du diagramme de figure 5.65. représente la dimension fractale de la rugosité du profil. Nous pouvons remarquer l'alignement des points. Ainsi la dimension fractale est valable sur la longueur d'évaluation. Le fort caractère fractal ($\Delta=1,98$) est dû à l'aspect fragile de la surface de rupture de l'échantillon en XC 65 trempé.

5.5.2. Résultats des mesures pour l'échantillon en verre de silice

Dans le cas de l'échantillon de verre de silice, les possibilités de mesure pour la détermination du profil de rupture sont pratiquement limitées à la profilométrie mécanique. La longueur mesurée sur laquelle sont pris 459 points de mesure, a été de 1,84 mm.

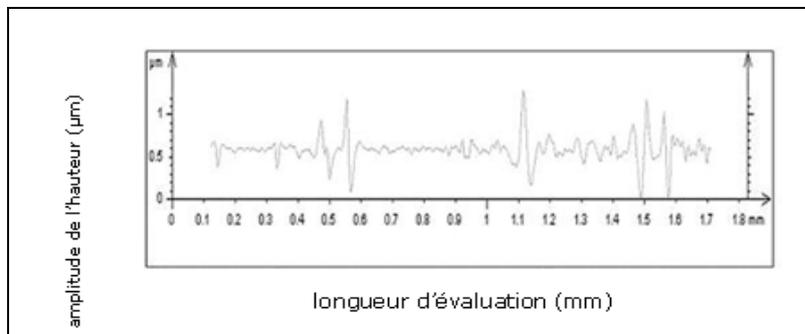


Fig. 5.63. Profil de la rugosité de la surface de rupture pour l'échantillon en verre de silice

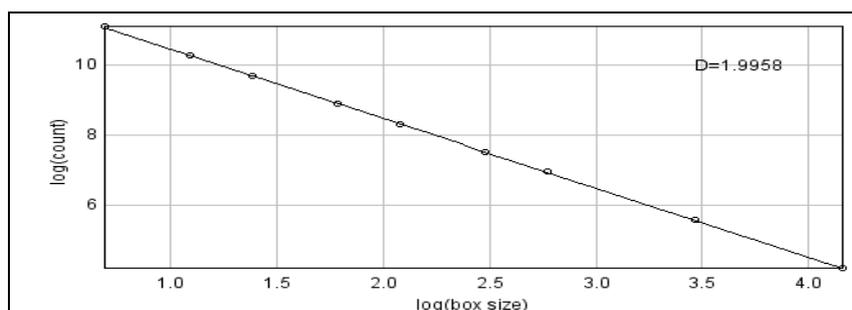


Fig. 5.64. Dimension fractale du profil de rugosité de la surface de rupture dans le programme *Image J* : $\Delta=1,99$

La pente du diagramme de figure 5.67 représente la dimension fractale de la rugosité du profil. Nous pouvons remarquer l'alignement des points. Ainsi, la dimension fractale est valable sur toute la longueur d'évaluation.

On remarque le fait que la dimension fractale dans le cas de l'échantillon en verre de silice a une valeur ($\Delta=1,99$), proche de celle obtenue pour le profil de l'échantillon en acier XC 65 trempé ($\Delta=1,98$); ce qui confirme l'aspect fragile de la rupture.

5.5.3. Estimation de la dimension fractale par la méthode de la Transformée de Fourier à l'aide du programme Origin

La méthode de la Transformée de Fourier pour l'estimation de la dimension fractale peut être appliquée seulement dans le cas de profils de rupture continus. Ces profils ont été obtenus par l'intermédiaire du profilomètre mécanique *Tencor P-10* dans le

cas de surfaces de rupture des éprouvettes Charpy présentant un caractère fragile (l'éprouvette confectionnée en XC 65 trempé et l'échantillon de verre).

Nous avons utilisé l'algorithme FFT (Fast Fourier Transform) du logiciel *Origin 7*, en vue de déterminer le spectre de puissance des profils de rupture.

Par la représentation du spectre de puissance (log (puissance) par rapport à log (fréquence)), nous obtenons une droite à *pente négative*. La valeur positive du module de cette pente est dite exposant spectral de corrélation, et il est noté β .

5.5.3.1. Spectre de Fourier du profil de rupture de l'échantillon en acier XC 65 trempé

Dans le cas du profil continu obtenu suite aux mesures réalisées par l'intermédiaire de la profilométrie mécanique *Tencor P-10*, le profil de rupture a été, d'abord, sauvegardé dans le programme *Image J*, puis inséré dans le programme *Origin*, pour le calcul du coefficient du spectre de Fourier, β . Nous avons, ainsi, obtenu graphiquement le filtrage linéaire du spectre Fourier (fig. 5.65).

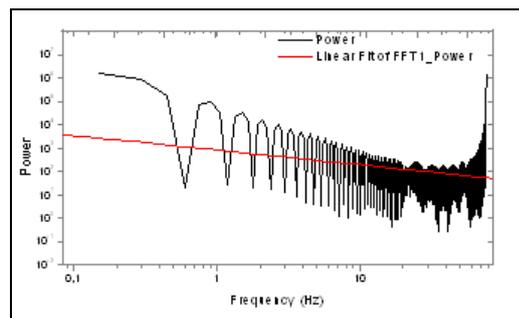


Fig. 5.65. Spectre de Fourier pour l'échantillon en acier XC 65 non traité thermiquement (coefficient du spectre Fourier $\beta=0,62$)

En utilisant la relation $\Delta = \frac{5-\beta}{2}$ on a obtenu la valeur 2,19 pour la dimension fractale.

5.5.3.2. Spectre de Fourier du profil de rupture de l'échantillon en verre de silice suite à la sollicitation à l'impact

Le profil de rupture de l'échantillon en fibre de verre a été sauvegardé d'abord dans le programme *Image J*, puis inséré dans le programme *Origin* pour le calcul du coefficient du spectre de Fourier, β . Nous avons obtenu graphiquement le filtrage linéaire du Spectre Fourier comme il est présenté dans la figure (5.66).

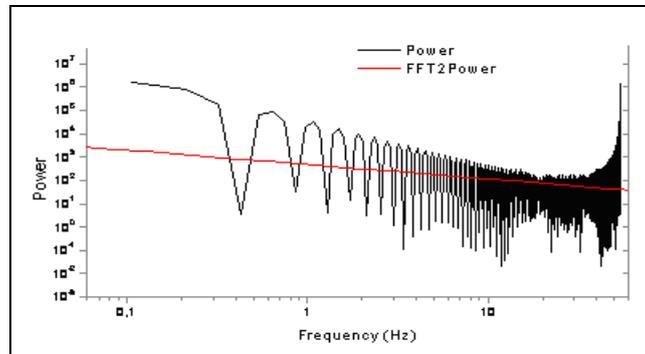


fig. 5.66. Spectre Fourier pour l'échantillon en verre de silice (coefficient du spectre Fourier $\beta=0,61$)

Pour le spectre de la figure ci-dessus, il s'en est résulté un coefficient du spectre Fourier $\beta=0,61$, qui a déterminé la même valeur pour la dimension fractale, que dans le cas de la figure 5.65.

La dimension fractale pour les profils de rupture doit être comprise dans l'intervalle $[1,2]$.

Dans le cas de l'application de la méthode de la Transformée de Fourier aux surfaces de rupture fragiles, on a pu remarquer une faible augmentation de la dimension fractale ($\Delta=2,19$), par rapport à la limite maximale admissible. Cette valeur supérieure à 2 de la dimension fractale est relative à la limite de la méthode de la transformation de Fourier, pour le calcul de la dimension fractale.

5.6. Conclusions du chapitre 5

Les recherches expérimentales ont mis en évidence le fait que la dimension fractale représente un paramètre qui peut différencier le comportement ductile fragile par des essais utilisant des éprouvettes Charpy.

On a analysé les appareils expérimentaux pour l'investigation du profil de rupture des éprouvettes Charpy: la profilométrie mécanique et l'interférométrie *Wyko NT 9300*. On a, ensuite, souligné les avantages et les limites des mesures effectuées en interférométrie.

L'application de la profilométrie mécanique pour la détermination de la dimension fractale des surfaces de rupture, dans le cas des éprouvettes Charpy, donne une nouvelle base aux techniques d'essais Charpy.

La méthode d'évaluation du périmètre des sections de rupture n'est pas recommandée dans le cas des éprouvettes Charpy et, dans le même temps, par cette caractéristique, on ne peut mettre en évidence le paramètre de ténacité dynamique.

Nous avons utilisé la méthode du Box Counting qui est généralement recommandée, afin d'estimer la dimension fractale des contours de matériaux obtenus par l'intermédiaire de la technique métallographique Slit Island. Cette méthode s'est également montrée efficace, pour la comparaison des dimensions fractales des échantillons de divers matériaux, dont le profil de rugosité a été obtenu en profilométrie tactile.

En appliquant la méthode des îles pour l'acier XC 65 non traité thermiquement, on a pu remarquer qu'avec un disque abrasif 800, la dimension fractale moyenne résultante a une valeur de $\Delta=1,53$.

Dans le cas de polissage avec un disque abrasif 4000, nous pouvons remarquer une meilleure résolution du contour des îles, ce qui n'entraîne pas d'influence sur la dimension fractale puisque celle-ci a une valeur moyenne de 1,54, très proche de la valeur précédente.

Suite aux recherches expérimentales, nous avons observé que la dimension fractale mesurée par la méthode de Section Verticale est systématiquement plus élevée que celle déterminée par la méthode des îles. Nous avons trouvé une relation entre la méthode de Section Verticale et la méthode des îles sous la forme:

$$\Delta_{SIM} = \Delta_{SV} - 0.4 \quad (5.1.)$$

où Δ_{SIM} : représente la dimension fractale obtenue par la méthode Slit Island ;

Δ_{SV} : représente la dimension fractale obtenue par la méthode de Section Verticale.

L'approximation des profils de rupture par la méthode de Section Verticale a conduit à des valeurs de la dimension fractale, proches de celles obtenues suite aux mesures par l'intermédiaire de la profilométrie mécanique.

Dans le cas de la rupture fragile, on a obtenu la même valeur pour la dimension fractale ($\Delta=2,19$) des échantillons en matériaux différents, par l'utilisation de la Transformée de Fourier. Cette valeur trop élevée de la dimension fractale du profil de rupture, fait que cette méthode ne soit pas recommandée pour calculer la dimension fractale des profils.

6. CONTRIBUTIONS CONCERNANT L'APPLICATION DE L'INTERFÉROMÉTRIE POUR LA DÉTERMINATION DES DIMENSIONS FRACTALES DES SURFACES DE RUPTURE DANS LE CAS DES ÉPROUVETTES CHARPY

Nous ne pouvons pas, directement, calculer la dimension fractale pour une surface de rupture. Cela se fait, cependant, pour le profil de rugosité obtenu suite aux mesures effectuées à l'aide du profilomètre optique *Wyko NT 9300*. Nous utiliserons l'algorithme du Box Counting appliqué dans le programme *Image ,J* pour déterminer la dimension fractale. Ainsi nous pouvons caractériser la rugosité du profil de rupture aux différents grossissements du microscope interférométrique du dispositif *Wyko NT 9300*, et analyser la valeur de la dimension fractale.

L'interférométrie est une méthode de mesure qui exploite les interférences intervenant entre plusieurs ondes cohérentes entre elles.

6.1. Le résultat des mesures pour l'échantillon en acier XC 65 non traité thermiquement

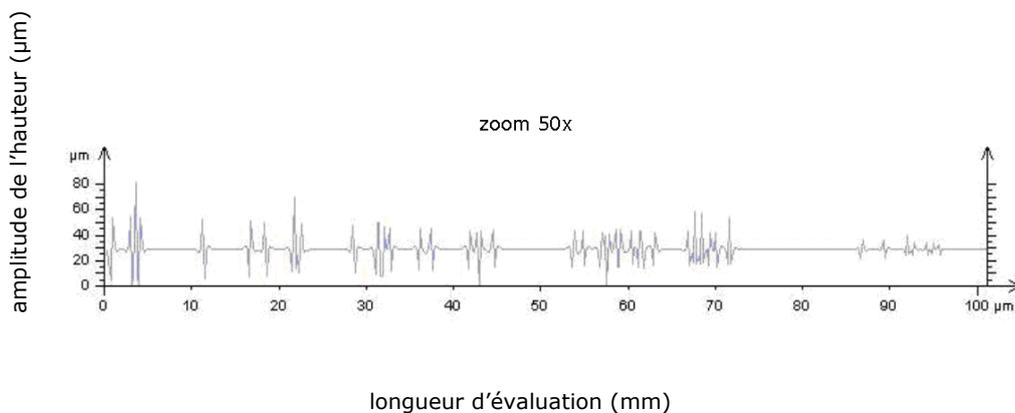


Fig. 6.1. Profil de la rugosité de la surface de rupture de l'éprouvette en XC 65 non traité thermiquement, réalisé par le mode de scannage VSI, (grossissement 50x)

La surface mesurée par l'intermédiaire du microscope interférométrique a été de: 101µm x513 points.