



HAL
open science

ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR ÉROSION DE CAVITATION DU CUIVRE DE NUANCE c2

J. Heuze, B. Dubois

► **To cite this version:**

J. Heuze, B. Dubois. ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR ÉROSION DE CAVITATION DU CUIVRE DE NUANCE c2. Journal de Physique Colloques, 1988, 49 (C3), pp.C3-339-C3-346. 10.1051/jphyscol:1988349 . jpa-00227772

HAL Id: jpa-00227772

<https://hal.science/jpa-00227772>

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.

ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR ÉROSION DE CAVITATION DU CUIVRE DE NUANCE c2

J.L. HEUZE*** et B. DUBOIS**

*STCAN, Groupe MNS, 8 Boulevard Victor, F-75015 Paris, France

**ENSCP, Laboratoire de Métallurgie Appliquée, 11, Rue Pierre et Marie Curie, F-75005 Paris, France

Résumé - L'endommagement par érosion de cavitation du cuivre de nuance c2 procède en 2 étapes: La phase de déformation au cours de laquelle il y a création de petites cavités accompagnées d'une ondulation de la surface et d'une délinéation des joints de grains et de macles. La seconde phase est la phase d'érosion, caractérisée par l'apparition de décohésions aux joints de grains et de macles, de fissures transgranulaires et de fragmentations des grains par un mécanisme de convergence des cavités.

Abstract - Pure copper cavitation erosion is basically governed by two steps: First deformation process, among wich formation of small pits, surface roughness, delineation of grain and twin boundaries occur. Second erosion process, among wich creation of decohesions of grain and twin boundaries, transgranular cracks and pits converging mechanism is observed.

1. INTRODUCTION

Avec pour objectif l'amélioration de la tenue en service des pièces soumises à la cavitation (hélices, aubes de turbine), une étude a été entreprise afin de déterminer les facteurs métallurgiques qui gouvernent le processus d'érosion accompagnant la cavitation. Le présent document regroupe les résultats obtenus sur le cuivre de nuance Cu-c2.

On rappelle que dans un écoulement liquide, la cavitation est la conséquence de l'apparition de cavités remplies de vapeur ou de gaz, puis de l'implosion de ces dernières sous l'effet d'une brusque augmentation de la pression. Quant à la formation des cavités, elle est due à une diminution locale de la pression de telle manière que celle-ci devienne inférieure à la tension de vapeur du liquide.

2. MATERIAU ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.1 Matériau

Le métal utilisé est le cuivre pur de nuance c2. Il a été approvisionné sous forme de barre de diamètre 25mm. La composition chimique figure dans le tableau n° 1. Elle est en accord avec la norme NF A 53-100.

Tableau 1- Composition chimique de la barre de cuivre Cu-c2

Elts (% en masse)	Cu	Ag	P	S	Pb	O ₂
Cu-c2	99,99	0,0025	0,0010	0,0020	0,0015	0,0019

Les échantillons de cuivre ont subi, après usinage, un traitement de recuit sous vide de 30 minutes à 750°C afin d'obtenir un état de référence sans contrainte et une taille de grains déterminée d'environ 200 µm.

Les cibles de cavitation ont ensuite été polies mécaniquement, puis un polissage électrolytique de 2 heures dans une solution d'acide phosphorique (d=1,44) a permis d'enlever toute trace d'érouissage.

Les caractéristiques physiques et mécaniques du cuivre Cu-c2 dans l'état métallurgique décrit sont regroupées dans le tableau n° 2.

Tableau 2 - Caractéristiques du Cuivre de nuance Cu-c2

Caractéristiques	Cuivre nuance Cu-c2
Structure	Cubique à Faces Centrées
Etat métallurgique	Recuit sous vide, 30 minutes à 750°C
Taille de grain	Environ 200 µm
Dureté initiale	54 ± 4 HV (état recuit)
Limite élastique (Rp 0,02)	48 MPa
Charge à rupture (Rm)	220 MPa
Allongement (A%)	55 %
Module d'Young (E)	130 GPa
Coefficient d'écroutissage (n)	0,18
Coefficient d'écroutissage cyclique (n')	0,23
Energie de défaut d'empilement (γ _S)	70 ± 15 mJ/m ² [1][2][3]
Densité (ρ)	8,96

2.2 Procédure Expérimentale

Les essais de cavitation ont été menés sur un Générateur de Vortex Cavitant (C.V.G.) plus couramment désigné sous le nom de Veine Tourbillon [4]. Cet appareil a été mis au point par la société NEYRTEC.

Les conditions expérimentales sont les suivantes:

- Pression amont : 0,5 MPa (5 bars)
- Pression aval : Pression atmosphérique
- Débit : 30 litres par minute
- Milieu d'essai : Eau déminéralisée, dégazée, additionnée d'inhibiteur de corrosion (Na₂Cr₂O₇ : 2,5 g/l tamponné au Na₃HPO₄, 12 H₂O : 2 g/l)
- pH de la solution : 6,7 ± 0,2
- Teneur en O₂ de la solution : 0,5 ± 0,2 ppm (0,5 ± 0,2 mg/l)
- Température : 25 ± 3 ° Celsius
- Rotation de l'obturateur : 7 impacts par seconde
- Surface de la cible : 113 mm²
- Surface impactée : 16 ± 4 mm²

L'observation des échantillons avant et après endommagement doit conduire, d'une part, à préciser la durée de la période d'incubation qui précède l'érosion et, d'autre part, à déterminer la vitesse d'érosion maximale et le temps mis pour l'atteindre.

Les méthodes d'investigation retenues sont les suivantes:

- Mesure de la perte de masse permettant de déterminer les courbes d'érosion du matériau
- Examen de la surface endommagée par microscopie optique et microscopie électronique à balayage
- Examen sur coupe transversale
- Observation de l'évolution structurale par microscopie à transmission et mesures de microdureté

3. RESULTATS

3.1- Courbes d'érosion

Les cibles ont été pesées avant et après cavitation. Afin de pouvoir comparer les matériaux entre eux, il est nécessaire de faire abstraction des différences de densité. C'est pourquoi les courbes d'érosion sont présentées sous forme de perte de volume. Deux types de courbes sont représentées figure 1:

- D'une part, $\Delta v = f(t)$ appelée courbe de perte de volume.
- D'autre part, $\Delta v/t = g(t)$ considérée comme la courbe d'érosion proprement dite.

t = Temps en heures

Δv = Perte de volume en mm³ ($\Delta v = \Delta m/t$)

Δm = Perte de masse en mg

Tableau 2 - Caractéristiques du Cuivre de nuance Cu-c2

Caractéristiques	Cuivre nuance Cu-c2
Structure	Cubique à Faces Centrées
Etat métallurgique	Recuit sous vide, 30 minutes à 750°C
Taille de grain	Environ 200 μm
Dureté initiale	54 \pm 4 HV (état recuit)
Limite élastique ($R_p 0,02$)	48 MPa
Charge à rupture (R_m)	220 MPa
Allongement (A%)	55 %
Module d'Young (E)	130 GPa
Coefficient d'écroutissage (n)	0,18
Coefficient d'écroutissage cyclique (n')	0,23
Energie de défaut d'empilement (γ_S)	70 \pm 15 mJ/m^2 [1][2][3]
Densité (ρ)	8,96

2.2 Procédure Expérimentale

Les essais de cavitation ont été menés sur un Générateur de Vortex Cavitant (C.V.G.) plus couramment désigné sous le nom de Veine Tourbillon [4]. Cet appareil a été mis au point par la société NEYRTEC.

Les conditions expérimentales sont les suivantes:

- Pression amont : 0,5 MPa (5 bars)
- Pression aval : Pression atmosphérique
- Débit : 30 litres par minute
- Milieu d'essai : Eau déminéralisée, dégazée, additionnée d'inhibiteur de corrosion ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: 2,5 g/l tamponné au Na_3HPO_4 , $12\text{H}_2\text{O}$: 2 g/l)
- pH de la solution : 6,7 \pm 0,2
- Teneur en O_2 de la solution : 0,5 \pm 0,2 ppm (0,5 \pm 0,2 mg/l)
- Température : 25 \pm 3 ° Celsius
- Rotation de l'obturateur : 7 impacts par seconde
- Surface de la cible : 113 mm^2
- Surface impactée : 16 \pm 4 mm^2

L'observation des échantillons avant et après endommagement doit conduire, d'une part, à préciser la durée de la période d'incubation qui précède l'érosion et, d'autre part, à déterminer la vitesse d'érosion maximale et le temps mis pour l'atteindre.

Les méthodes d'investigation retenues sont les suivantes:

- Mesure de la perte de masse permettant de déterminer les courbes d'érosion du matériau
- Examen de la surface endommagée par microscopie optique et microscopie électronique à balayage
- Examen sur coupe transversale
- Observation de l'évolution structurale par microscopie à transmission et mesures de microdureté

3. RESULTATS

3.1- Courbes d'érosion

Les cibles ont été pesées avant et après cavitation. Afin de pouvoir comparer les matériaux entre eux, il est nécessaire de faire abstraction des différences de densité. C'est pourquoi les courbes d'érosion sont présentées sous forme de perte de volume. Deux types de courbes sont représentées figure 1:

- D'une part, $\Delta v = f(t)$ appelée courbe de perte de volume.
- D'autre part, $\Delta v/t = g(t)$ considérée comme la courbe d'érosion proprement dite.

t = Temps en heures

Δv = Perte de volume en mm^3 ($\Delta v = \Delta m/t$)

Δm = Perte de masse en mg

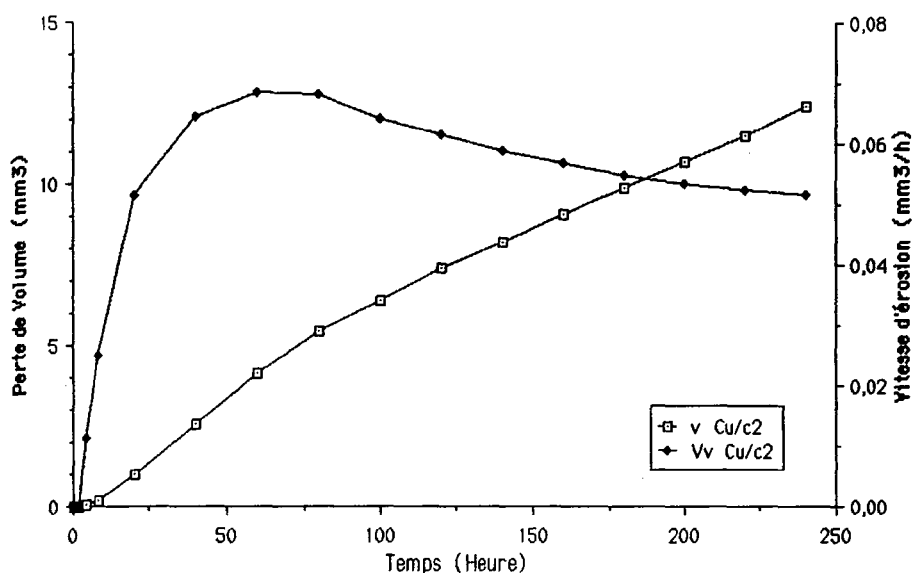


Fig. 1 - COURBE D'EROSION DU CUIVRE nuance Cu/c2

Certaines valeurs, déterminées à partir des courbes d'érosion, peuvent caractériser l'endommagement du matériau. Sur la **courbe de perte de volume**, la **pente** de la partie droite (vitesse d'érosion constante) peut être considérée comme une des valeurs caractéristiques de la résistance du matériau. Sur la courbe d'érosion, les valeurs caractéristiques sont:

- La durée de la période d'incubation (absence de perte de masse) : **Ti**
- La vitesse d'érosion maximale : **Vmax.**
- Le temps nécessaire pour atteindre Vmax. : **Tmax.**

Pour le Cuivre de nuance Cu-c2, ces valeurs sont regroupées dans le tableau 3 :

Tableau 3 - Paramètres caractéristiques du cuivre de nuance Cu-c2

Paramètres Caractéristiques	Pente n	Ti (heure)	Tmax. (heure)	Vmax. (mm ³ /h)
Cu-c2	0,43	3	60	0,0683

Les résultats obtenus ont servi de base de comparaison pour les alliages cuivreux d'une part [5], et pour trois nuances d'aciers inoxydables d'autre part [5][6]. Une relation intéressante a pu être établie entre **Ti** et **Vmax** pour 7 matériaux de structure Cubique à Faces Centrées :

$$V_{max.} = 0,3 Ti^{-1.2} \quad (\text{Coefficient de corrélation: } r = 0,98)$$

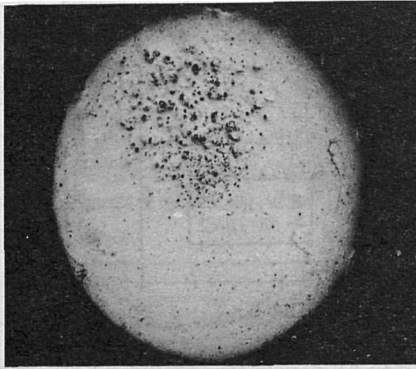
3.2 - Examens de surface

La macrographie effectuée après seulement 140 secondes de cavitation, soit environ 1000 impacts montre le type d'endommagement occasionné à la cible (Fig. 2). Les impacts sont concentrés dans une zone d'environ 5 mm de diamètre. La déformation plastique occasionnée à la cible dès le début de l'impactage montre que les contraintes induites dans le matériau dépassent largement sa limite d'élasticité. AVELLAN et FARHAT [7] à partir d'une étude approfondie des vortex cavitants sur la Veine Tourbillon, ont mis en évidence que le niveau de surpression créé par les ondes de choc pouvait atteindre des valeurs de l'ordre de **2000 MPa**.

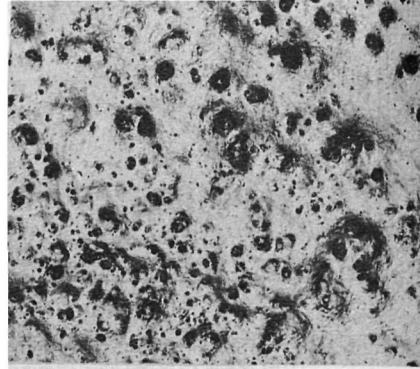
La répartition des cavités, alléatoire, est gouvernée par l'écoulement et le comportement hélicoïdal du vortex au sein de l'écoulement. Une vue à plus fort grossissement (Fig. 3) met en évidence:

- Des cavités de taille et de diamètre variables (10 à 100 µm de diamètre)
- Des différences de profondeur au niveau des cavités créées

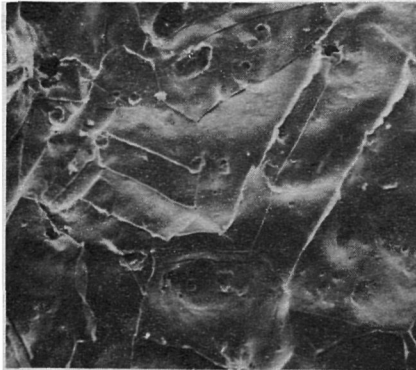
- La "coalescence" de cavités conduisant à la formation de cratères de plus grandes dimensions de 100 à 250 μm de diamètre. Au début de la phase d'érosion, c'est à dire après 4 heures de cavitation le bord de la zone cavitée (Fig. 4) présente une ondulation importante de la surface et une forte délinéation des joints de grains et de macles. Le centre de la zone endommagée a, quant à lui, perdu toute caractéristique structurale (Fig. 5). On peut observer des décohésions intergranulaires particulièrement développées aux niveau des joints triples. De nombreuses cavités se propagent à l'intérieur des grains de manière transgranulaire provoquant, à terme, la fragmentation de ces derniers.



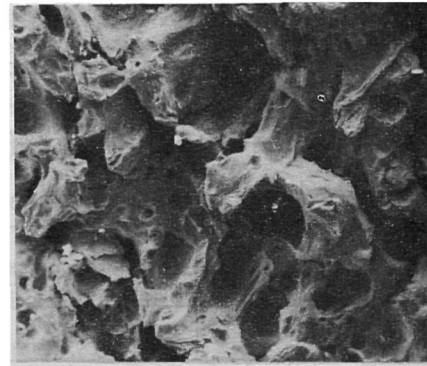
1mm 1000 Impacts (140 sec.) X 6
Fig. 2 - Examen macrographique de surface



400 μm 1000 Impacts (140 sec.) X 25
Fig. 3 - Examen micrographique de surface



100 μm 100.000 Imp. (4 heures) X 100
Fig. 4 - Examen de surface au M.E.B.



100 μm 100.000 Imp. (4 heures) X 100
Fig. 5 - Examen de surface au M.E.B.

3.3 - Examen micrographique sur coupe transversale

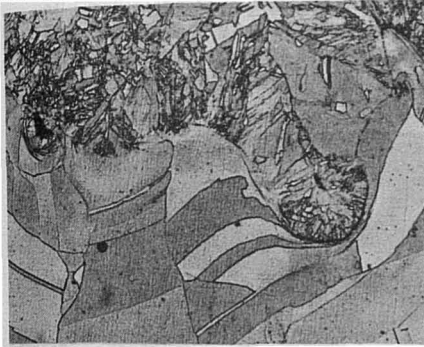
- Mode opératoire:

Les examens sur coupe ont été réalisés après enrobage des échantillons dans un dépôt de cuivre. Les coupes passent par le centre de la zone la plus perturbée. Pour mettre en évidence les déformations, les échantillons ont subi une attaque électrolytique au tampon avec une solution d'hyposulfite de sodium à 1% dans l'eau sous une tension de 10 Volts.

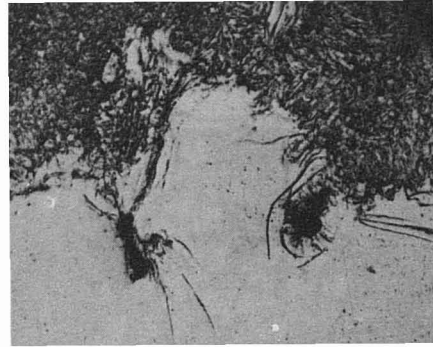
- Observations:

Après 4 heures d'exposition (Fig. 6), les cavités atteignent jusqu'à 100 μm de profondeur. Les grains immédiatement sous la surface sont mis en compression et le relâchement des contraintes s'effectue par formation de lignes de glissement persistantes. Les macles de croissance sont très déformées et suivent le profil du fond de la cavité. Le diamètre de celle-ci est d'environ 40 μm . Enfin, les figures 6 et 7 montrent que les cavités ne sont pas toutes orientées perpendiculairement à la surface mais forment un angle d'environ 45 degrés avec celle-ci. De plus, on observe sur la figure 7 que les 2 cavités convergent l'une vers l'autre ce qui devrait conduire à terme à

l'éjection d'un fragment du grain attaqué.



25 μm 100.000 Imp. (4 heures) X 400
Fig. 6 - Examen sur coupe transversale



25 μm 100.000 Imp. (4 heures) X 400
Fig. 7 - Examen sur coupe transversale

3.4 - Evolution structurale

a) Mesure de microdureté sur coupe:

La charge utilisée est de 0,4903 N. Les filiations sont établies à partir de la surface jusqu'à une distance permettant de retrouver la dureté du métal de base. La figure 8 présentant les résultats permet d'observer que:

- La profondeur de la zone écrouie peut être estimée à **1 200 μm**.
- La dureté maximale enregistrée est de **118 HV**. Elle est atteinte après seulement **2 heures** de cavitation, c'est à dire au deux tiers de la période d'incubation.
- La courbe obtenue sur l'échantillon ayant subi 40 heures de cavitation présente une baisse notable de microdureté, par rapport à la valeur de dureté maximale enregistrée, sur une profondeur de **100 μm** sous la surface.

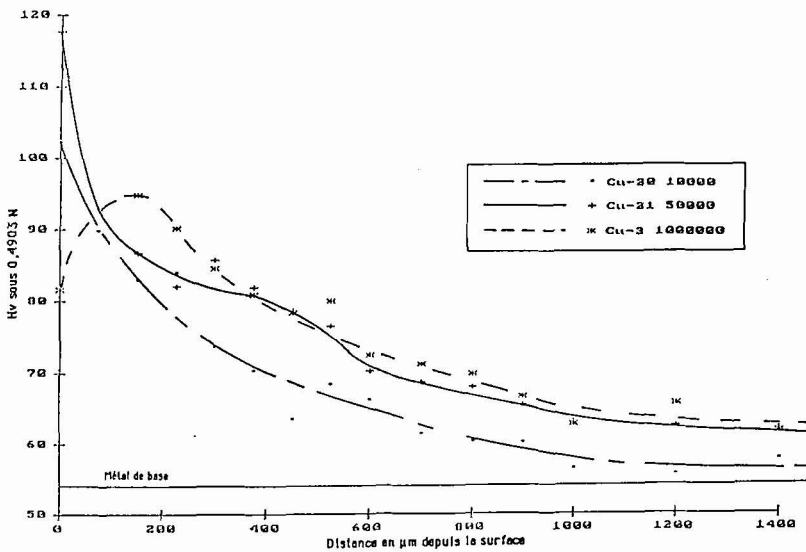
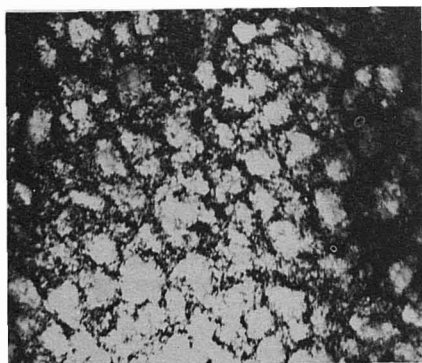


Fig. 8 - Courbes de microdureté sur coupes transversales du cuivre de nuance Cu-2

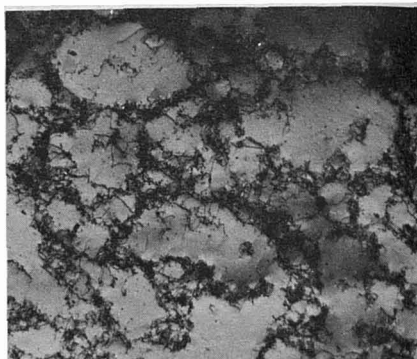
b) Examen sur lame mince:

Les lames minces ont été prélevées directement sous la surface soumise à la cavitation. Le mécanisme de déformation mis en évidence (Fig. 9 et 10) est le suivant: Arrangement des dislocations en un réseau tridimensionnel de cellules, caractéristique du glissement dévié des dislocations vis. Le maillage mécanique n'a pas

été mis en évidence. On note la présence de cellules après seulement 140 secondes de cavitation soit approximativement après 1000 impacts. On observe dans un premier temps, une diminution du diamètre des cellules qui passent de $1,8 \mu\text{m}$ après 140 secondes à $0,7 \mu\text{m}$ de diamètre après 4 heures de cavitation (Fig. 9), puis dans un second temps, une augmentation puisque le diamètre moyen après 40 heures est de $2 \mu\text{m}$ (Fig. 10). Ces modifications du diamètre des cellules sont liées à la variation de la densité de dislocations dans le métal.



1 μm 100.000 Imp. (4 heures) X 10.000
Fig. 9 - Examen sur lame mince au M.E.T.



1 μm 1.000.000 Imp. (40 heures) X 10.000
Fig. 10 - Examen sur lame mince au M.E.T.

4. DISCUSSION DES RESULTATS

- Les observations sur coupe transversale effectuées sur le cuivre, mais également sur d'autres métaux et alliages [5] [6], conduisent à proposer comme un des modes privilégiés de fragmentation des grains, le mécanisme de convergence des cavités schématisé de la manière suivante:

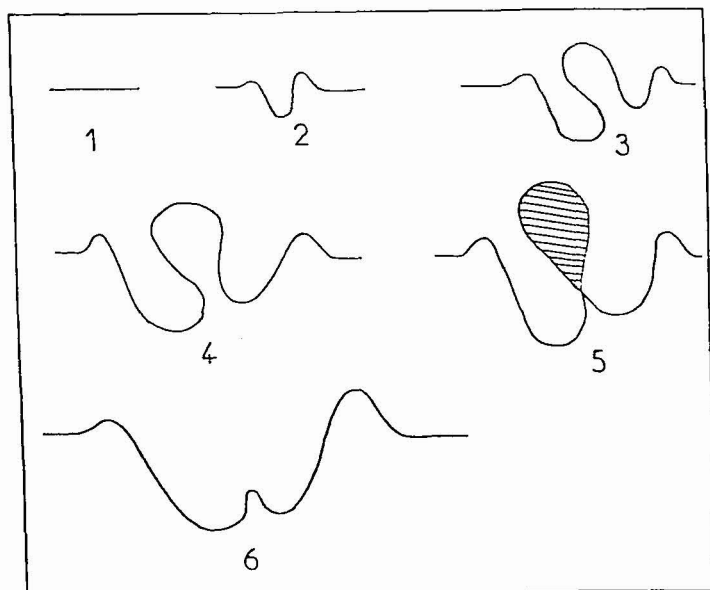


Fig. 11 - Fragmentation des grains par mécanisme de convergence des cavités

- Le mode de déformation principal observé est le glissement. Toutefois, le maclage comme mode de déformation secondaire n'est pas exclu. En effet, KARIMI et MAAMOURI [8] l'ont mis en évidence sur des monocristaux de cuivre orientés selon les directions $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$. L'accommodation de la déformation par formation de cellules tridimensionnelles de dislocations correspond à la sous-structure observée couramment sur les métaux ayant une énergie de défauts d'empilement $\gamma_s > 50 \text{ mJ/m}^2$, ce qui est le cas du cuivre pur.

- La diminution de dureté ainsi que l'augmentation de la taille des cellules de dislocations observées après 4 heures de cavitation, c'est à dire dès le début de la phase d'érosion, permet de supposer qu'il se produit un phénomène de **restauration dynamique**. Ce phénomène a également été mis en évidence sur le cuivre monocristallin [8].

- L'étude étendue à une série de 4 alliages cuivreux et un acier inoxydable [5] a permis de mettre en évidence l'existence d'une corrélation entre T_i et γ_s pour les métaux cuivreux:

$$T_i = 82 \gamma_s^{-0,77}$$

Cette relation n'est toutefois pas transposable à l'ensemble des métaux de structure Cubique à Faces Centrées.

5. CONCLUSION

- Le phénomène d'érosion de cavitation est essentiellement un phénomène d'endommagement de nature mécanique. Toutefois, en fonction du milieu, des phénomènes électrochimiques de corrosion peuvent provoquer un effet de synergie et accélérer considérablement la dégradation du matériau.

- Le mécanisme d'endommagement du cuivre de nuance c2 sous l'effet des ondes de choc de cavitation peut se résumer par le tableau suivant:

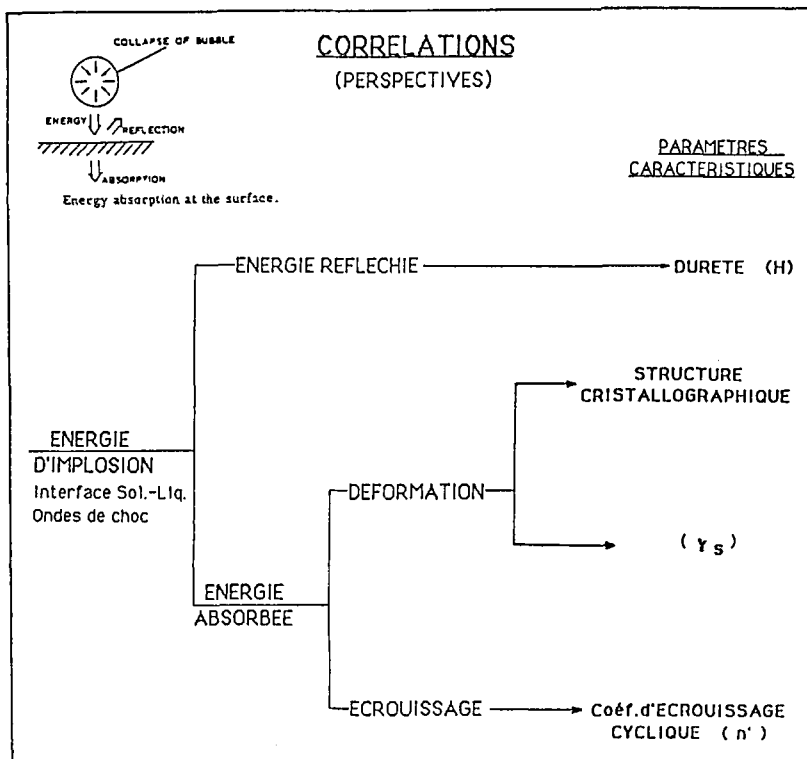
Tableau 4 - Résumé du mécanisme d'endommagement du cuivre par cavitation

<u>MECANISME D' ENDOMMAGEMENT PAR CAVITATION</u>	
<u>1ère PHASE: DEFORMATION</u>	
(Période d'Incubation)	
* Création de petites cavités ----->	Formation d'un bourrelet de métal repoussé.
* Déformation globale ----->	Ondulation générale de la surface Délinéation aux joints de grains et de macles.
<u>2ème PHASE: EROSION</u>	
* Apparition de décohésions et de microfissures ----->	Ruptures aux joints de grains et de macles. Mode Intergranulaire
* Convergence des cavités ----->	Fragmentation des grains. Mode Transgranulaire

- La période d'incubation est le domaine au cours duquel se produisent toutes les modifications structurales du matériau. La détermination précise de cette période est donc très importante du point de vue industriel.

- Les propriétés mécaniques et de structures qui jouent un rôle dans le contrôle du processus d'érosion sont les suivantes:

Tableau 5 - Perspectives de correlations avec des propriétés physiques et mécaniques des métaux



BIBLIOGRAPHIE :

- [1] **P.C.J. GALLAGHER**
Met. Trans., Vol. 1, p 2429, Sept. 1970
- [2] **C.B. CARTER, I.L.F. RAY**
Phil. Mag., Vol. 35, pp 189-200, 1977
- [3] **L.E. MURR**
Shock waves and high strain rate phenomena in metals.
Ed. M.A. MEYER and L.E. MURR, Plenum Press N.Y., Chap 37, p 658, 1981
- [4] **Y. LECOFFRE, J. MARCOZ, R. ANSELME**
Rapport NEYRTEC R20 246, Déc. 1980
- [5] **J.L. HEUZE**
Colloque CAVITATION de la Société Hydrotechnique de France, Session N° 136, N°9, 22-23 Mars 1988
- [6] **J.L. HEUZE**
Bulletin de l'Association Technique Maritime et Aéronautique (A.T.M.A.), Vol. 87, Mai 1987.
- [7] **F. AVELLAN, M. FARHAT**
Colloque CAVITATION de la Société Hydrotechnique de France, Session N° 136, N°7, 22-23 Mars 1988
- [8] **A. KARIMI, M. MAAMOURI**
Colloque CAVITATION de la Société Hydrotechnique de France, Session N° 136, N°8, 22-23 Mars 1988