

La cavitation et ses effets érosifs sur une surface

Thomas Belhafaoui

Lycée Louis-le-Grand

2009 - 2010

La cavitation et ses effets érosifs sur une surface

Deux processus érosifs différents

Observation de pièces mécaniques en mouvement dans un liquide (hélices, pompes...) endommagées.

- Par la corrosion chimique
- Par l'implosion de bulles de cavitation

Définition

Cavitation : naissance et croissance de bulles dans un liquide suite à une dépression.

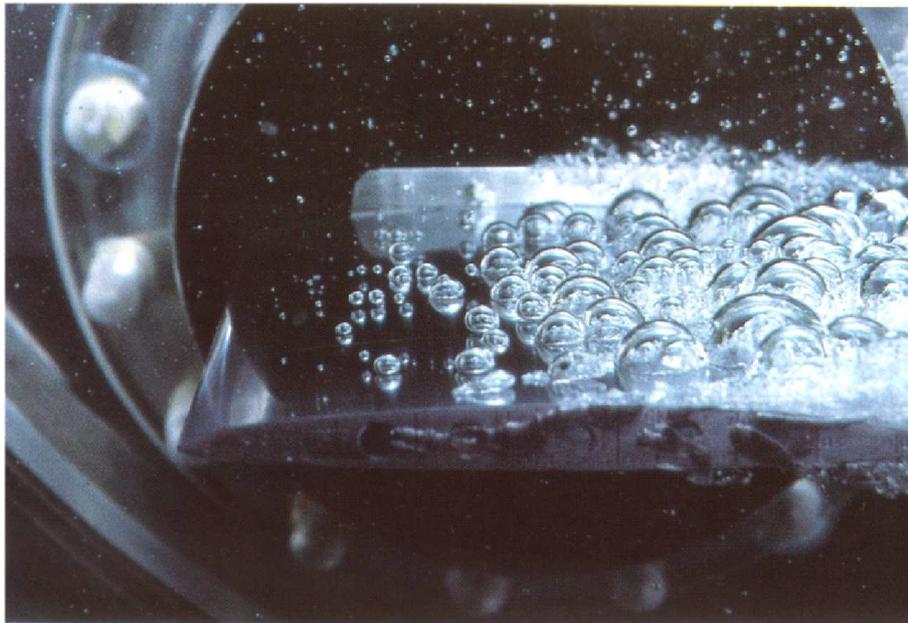


Figure: Bulles de cavitation sur un profil d'aile

Deux types de cavitation

- Acoustique : onde entraînant des variations de densité du liquide
- Hydrodynamique : écoulement fluide (vitesse)

1 Le phénomène de cavitation

- Apparition des bulles - principe de Bernoulli
- Illustration : cavitation dans une seringue
- Grossissement et implosion - équilibre de Blake
- Ordres de grandeur
- Formation et rôle du microjet

2 Mise en évidence de la cavitation

- Expérience : hélice en rotation dans l'eau

3 Le phénomène d'érosion

- Mise en évidence du phénomène
- Evolution temporelle
- Interdépendance des stades préliminaire et avancé
- Liens avec les propriétés mécaniques

Pourquoi des bulles apparaissent-elles ?

Hypothèses sur le liquide

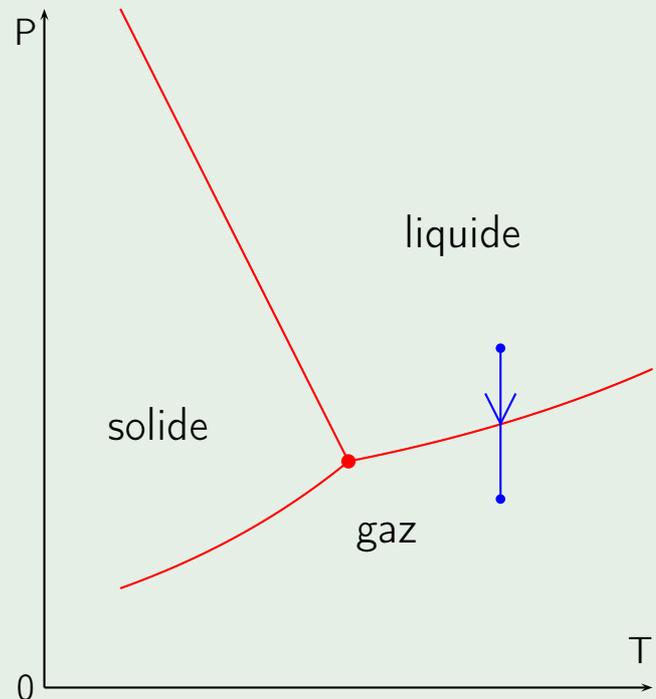
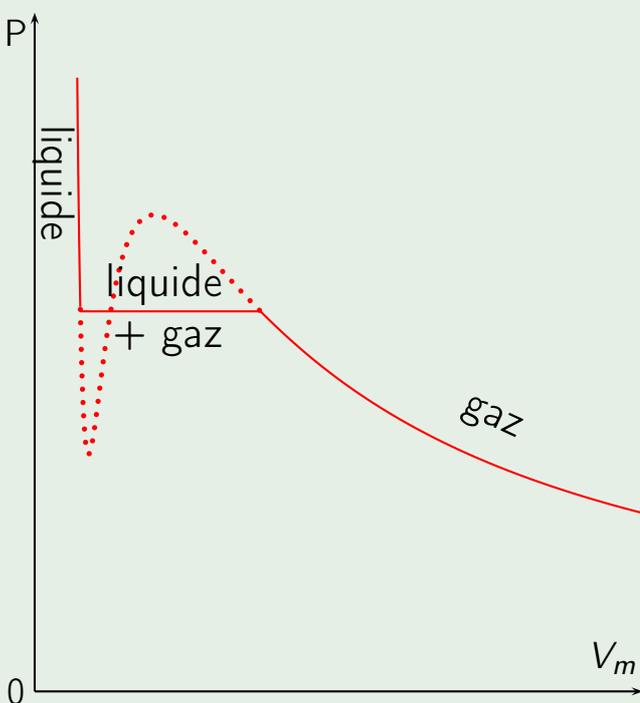
- Newtonien
- Incompressible
- Non visqueux
- A température constante

Principe de Bernoulli

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + P = cst$$

Augmentation de vitesse \Rightarrow diminution de pression

Isotherme d'Andrews et diagramme de phase de l'eau (P,T)



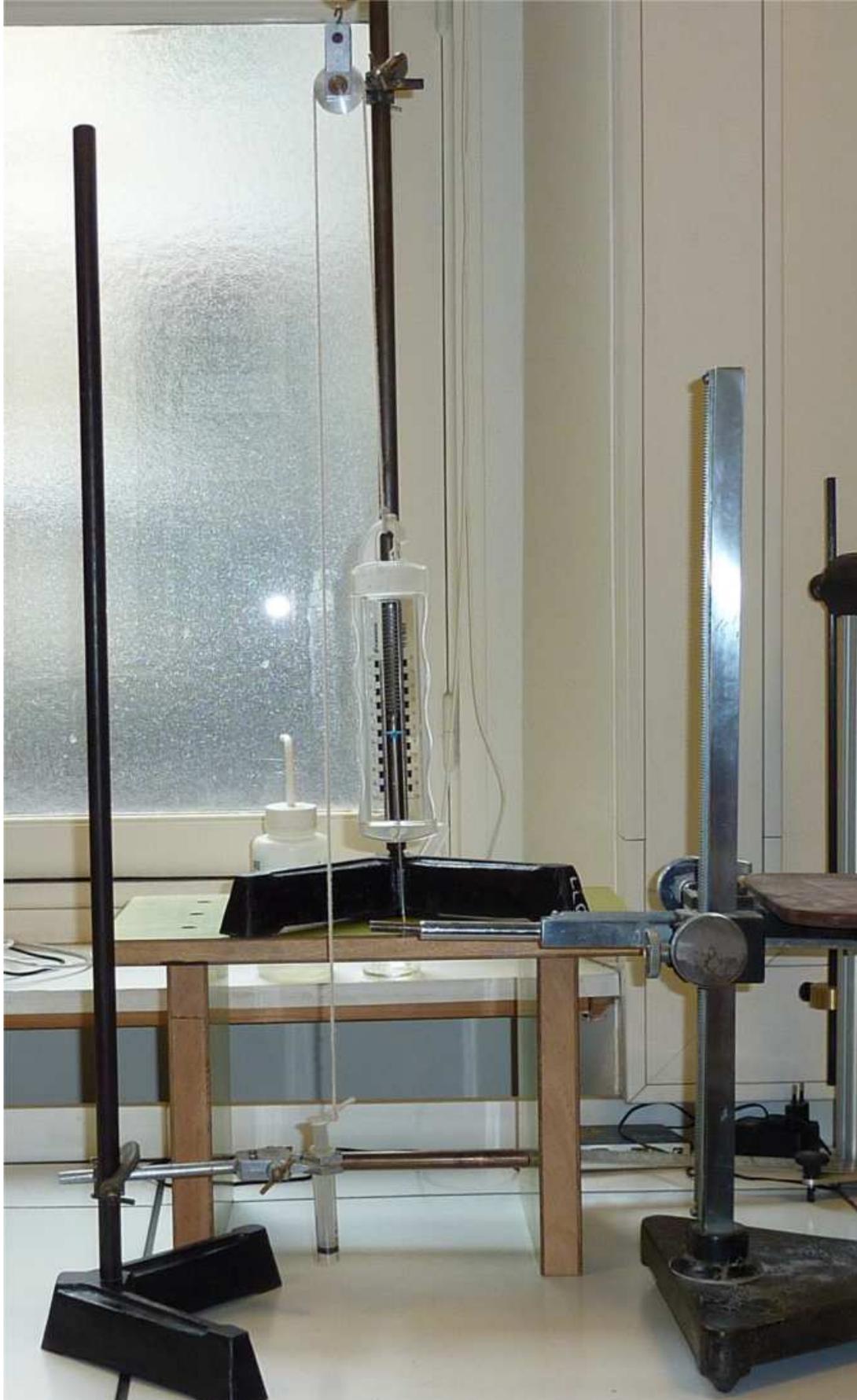
Interprétation

Diminution de pression \Rightarrow état métastable (liquide) \Rightarrow vaporisation

Le phénomène de cavitation
Mise en évidence de la cavitation
Le phénomène d'érosion

Apparition des bulles - principe de Bernoulli
Illustration : cavitation dans une seringue
Grossissement et implosion - équilibre de Blake
Ordres de grandeur
Formation et rôle du microjet

Dispositif expérimental 1 : force de frottement



Dispositif expérimental 2 : force de rupture



Mesure de la pression de vapeur saturante

Résultats

Force de frottement :

$$2,1N < F_f < 9,2N$$

$$F_{f_{moy}} = 5,7N$$

Force mesurée au dynamomètre :

$$F_{dyn} \approx 16N$$

Force exercée par la masse de 500g :

$$F_{masse} \approx 4,9N$$

Total : force de rupture

$$F_{exp} = F_{dyn} + F_{masse} - F_{f_{moy}}$$

$$F_{exp} = 15,3N$$

Calcul théorique

$$F_{theo} = (P_{atm} - P_{sat}) \pi R^2$$

$$F_{theo} = 16,3N$$

avec $P_{atm} = 1,0 \cdot 10^5 Pa$, $P_{sat} = 2,6 \cdot 10^3 Pa$, $R = 7,3mm$

Bilan

Erreur de 6% (présence d'air)

Pourquoi les bulles grossissent et implosent-elles ?

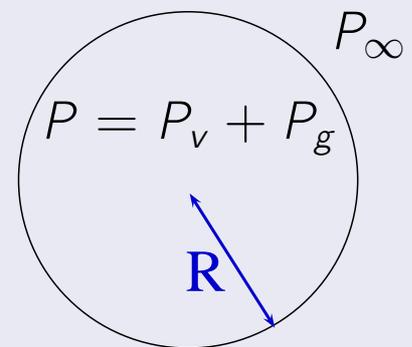
Equilibre de l'interface (modèle de Blake)

Présence de germe sphérique (microbulle de gaz) de rayon R_0 à t_0 :

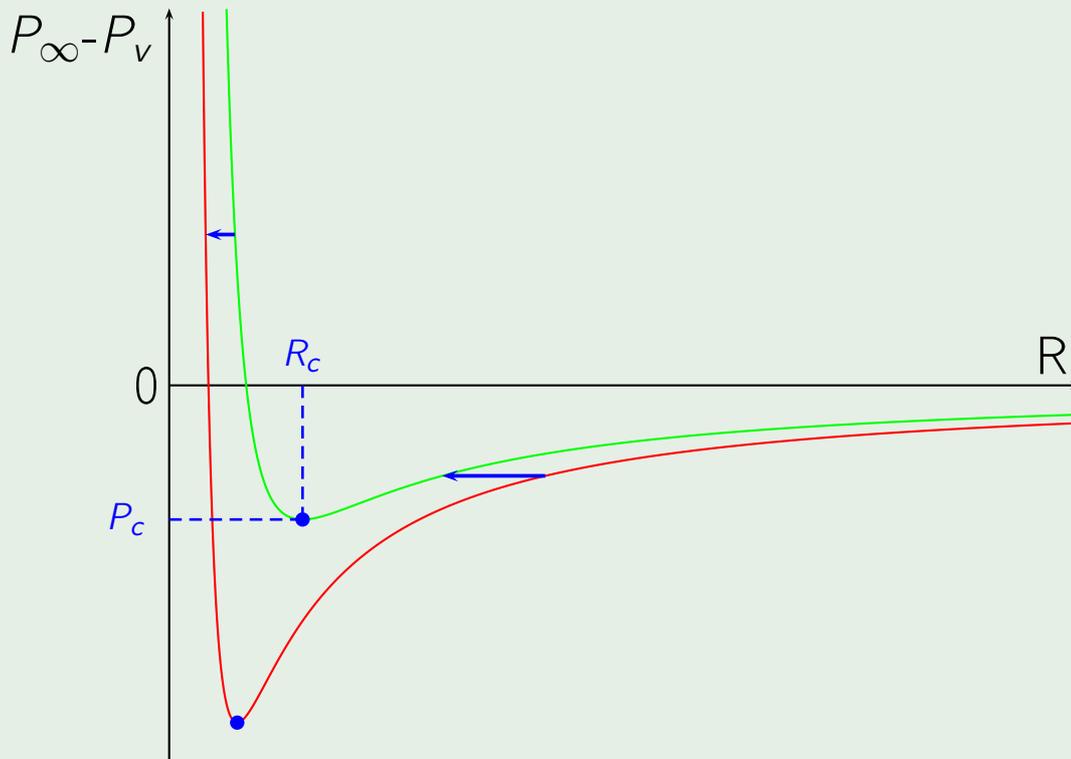
$$P_\infty - P_v = P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2S}{R}$$

avec :

- P_∞ la pression dans le liquide
- P_{g0} la pression de gaz dans la bulle à t_0
- P_v la pression de valeur saturante du liquide
- R le rayon de la bulle
- S la tension de surface



Courbe d'équilibre de Blake ($P_{g0 \text{ rouge}} > P_{g0 \text{ vert}}$)



Stabilité en fonction de la pression critique P_c

Stable pour $P > P_c$, instable pour $P < P_c$

Ordres de grandeur : vitesse, temps, pression

Equation simplifiée de Rayleigh-Plesset

$$\rho(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2) = P_v - P_\infty$$

Vitesse d'implosion ($R \ll R_0$)

$$\dot{R} \approx -\sqrt{\frac{2P_{ext}-P_v}{3\rho} \left(\frac{R_0}{R}\right)^3} \approx 730\text{m.s}^{-1} \approx \frac{c_{son \text{ dans l'eau}}}{2}$$

(avec $\frac{R}{R_0} = \frac{1}{20}$, $P_\infty = 10^5\text{Pa}$ et $P_v = 2400\text{Pa}$)

Temps d'implosion (temps de Rayleigh)

$$t_{implosion} \approx 0,5\text{ms}$$

(avec $R_0 = 1\text{cm}$, $P_\infty = 10^5\text{Pa}$ et $P_v = 2400\text{Pa}$)

Pression à l'implosion

$$P_{max} = P_\infty \left[1 + \frac{1}{4^{4/3}} \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 \right] \approx 1.010^6\text{Pa}$$

(avec $P_v = 2400\text{Pa} \ll P_\infty = 10^5\text{Pa}$, $\frac{R}{R_0} = \frac{1}{4}$)

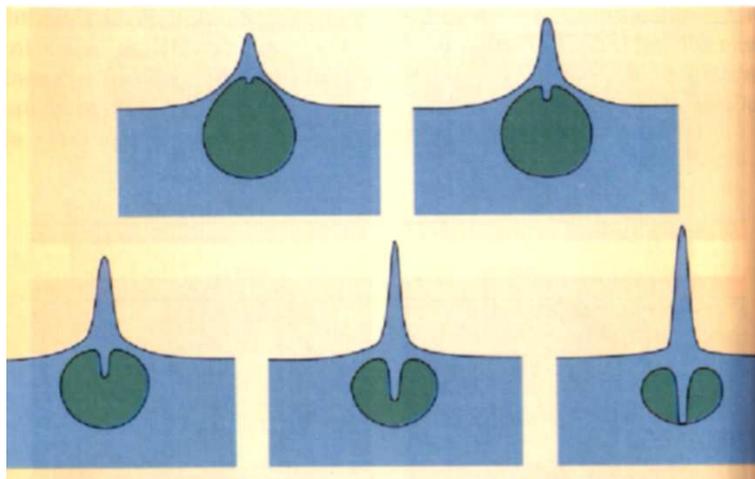
Le microjet

Formation du microjet

A proximité de la surface : déformation de la bulle.

→ Aplatissement côté surface, alors que la face opposée continue d'avancer et se rapproche du centre.

→ Naissance d'un jet dirigé vers la paroi.



Suppression sur la surface

$$\Delta P = \frac{\rho_l c_l v_j}{1 + \frac{\rho_l c_l}{\rho_s c_s}} \approx \rho_l c_l v_j \approx 220 \text{ MPa}$$

(pour $c_s \gg c_l$)

avec :

- v_j la vitesse du microjet (A.N. 150 m.s^{-1})
- c_l la célérité du son dans le liquide (A.N. 1450 m.s^{-1})
- c_s la célérité du son dans la surface
- ρ_l la masse volumique du liquide (A.N. 1000 kg.m^{-3})
- ρ_s la masse volumique du solide

Conséquences

Suppression : ordre de grandeur comparable aux limites de résistances de nombreux matériaux.

→ Peut endommager la surface

Protocole expérimental et résultats

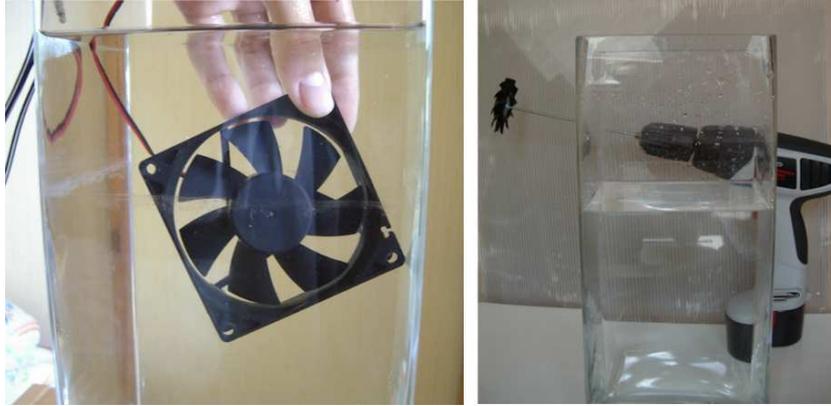


Figure: Ventilateur alimenté en 12V / Hélice de ventilateur d'ordinateur, montée sur une perceuse

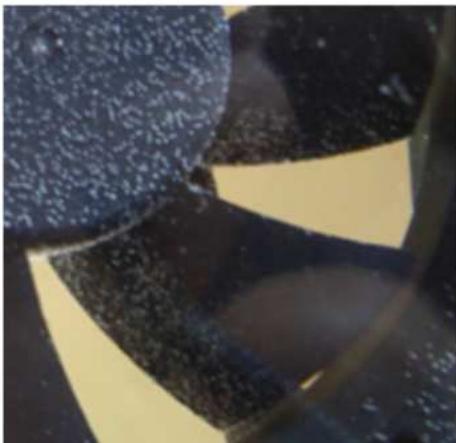
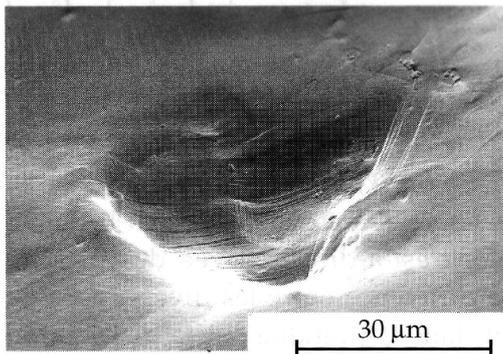
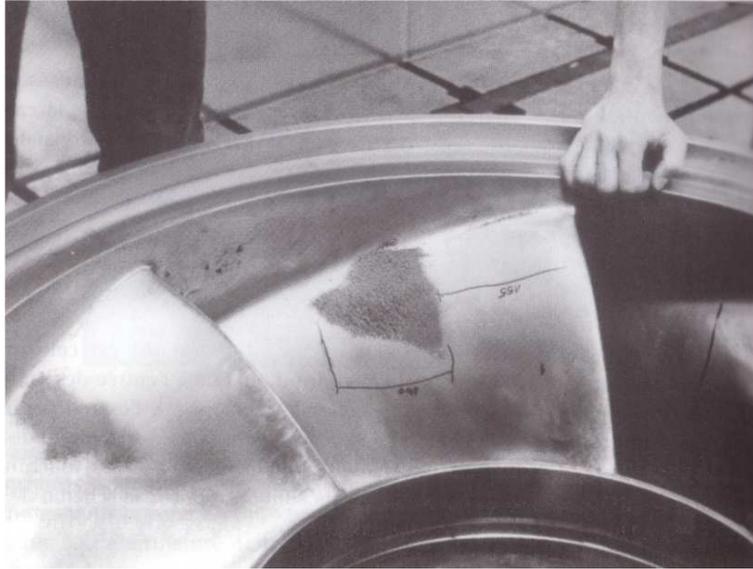
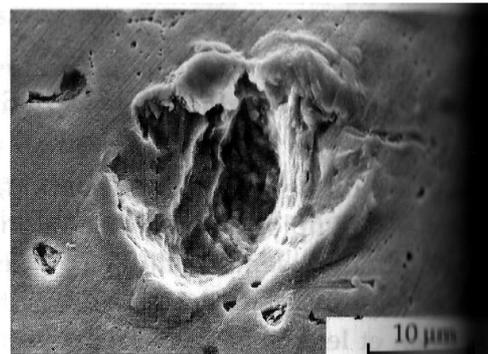


Figure: Résultats : bulles localisées surtout aux endroits où la vitesse est élevée (principe de Bernoulli)

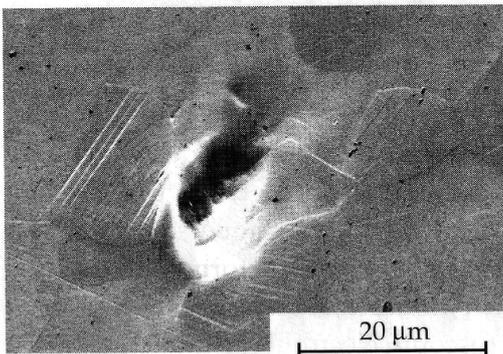
Surfaces érodées



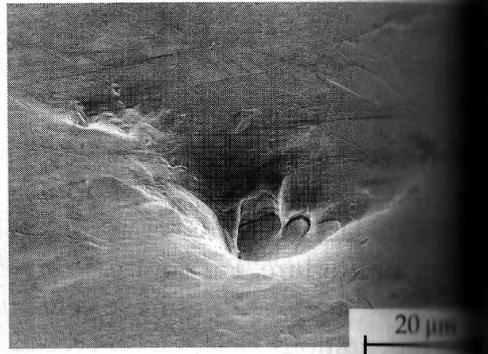
a. acier inoxydable austénitique 18-12



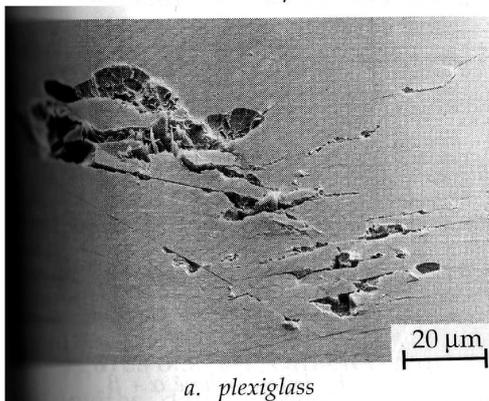
b. laiton biphasé $\alpha + \beta$



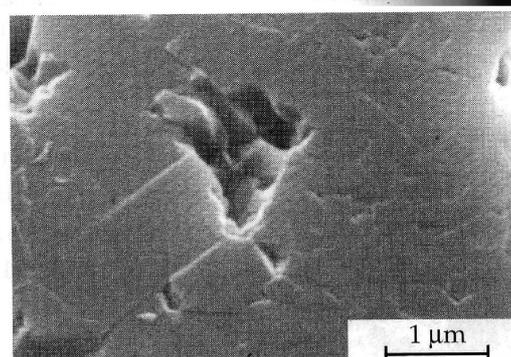
c. acier duplex 25-6



d. bronze d'aluminium

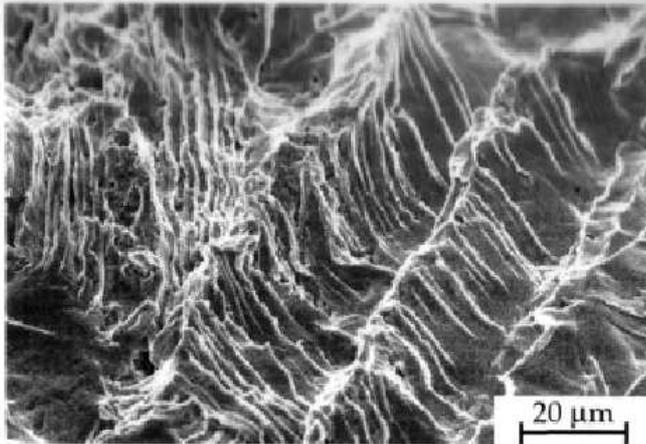


a. plexiglass

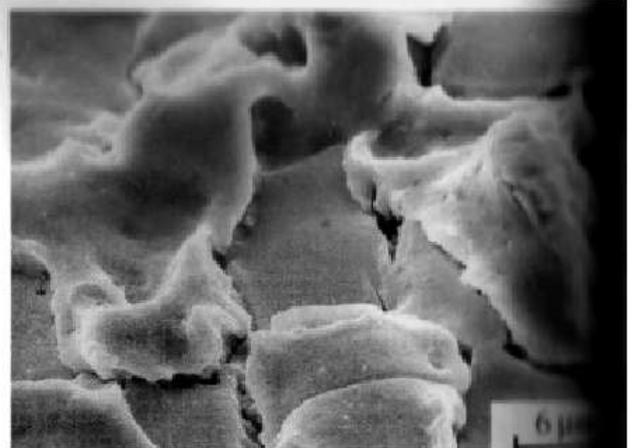


b. nitrure de silicium

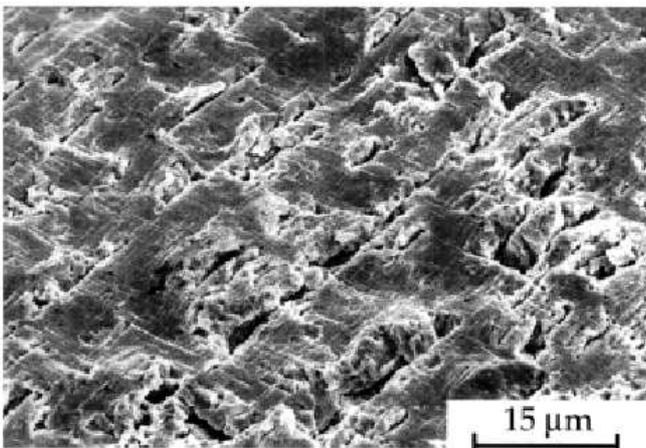
Surfaces érodées



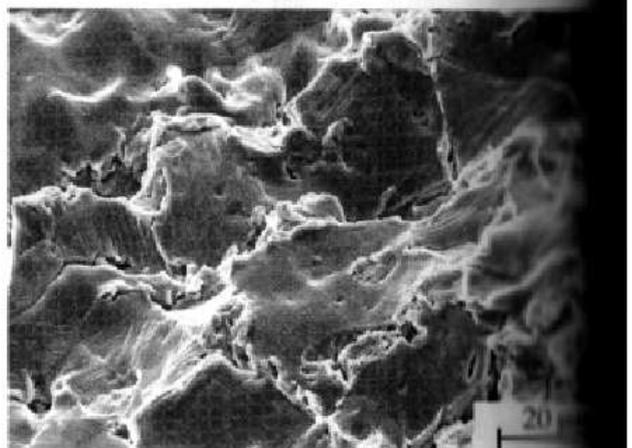
a. acier inoxydable austénitique 18-12



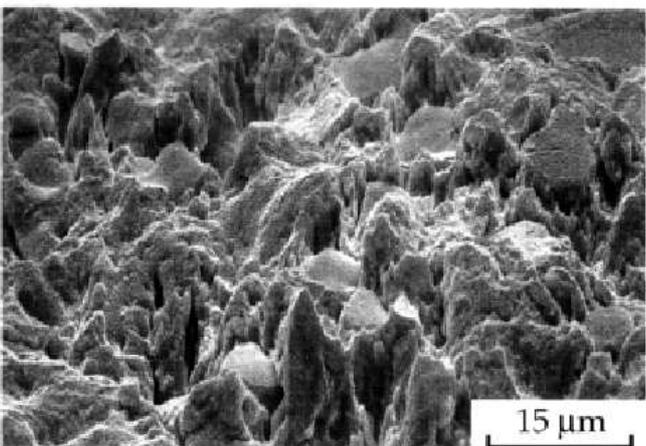
b. laiton biphase $\alpha + \beta$



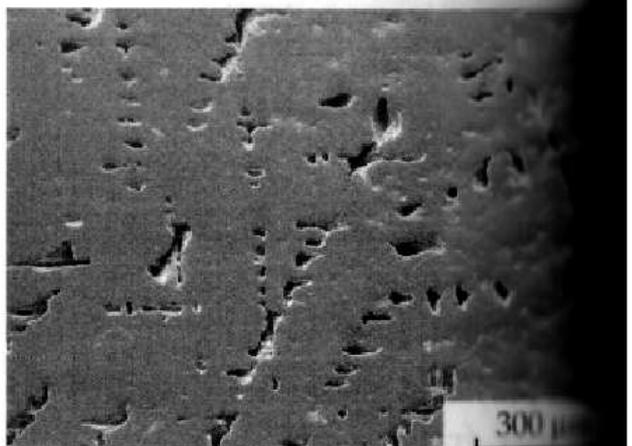
c. stellite 21



d. acier duplex 25-6

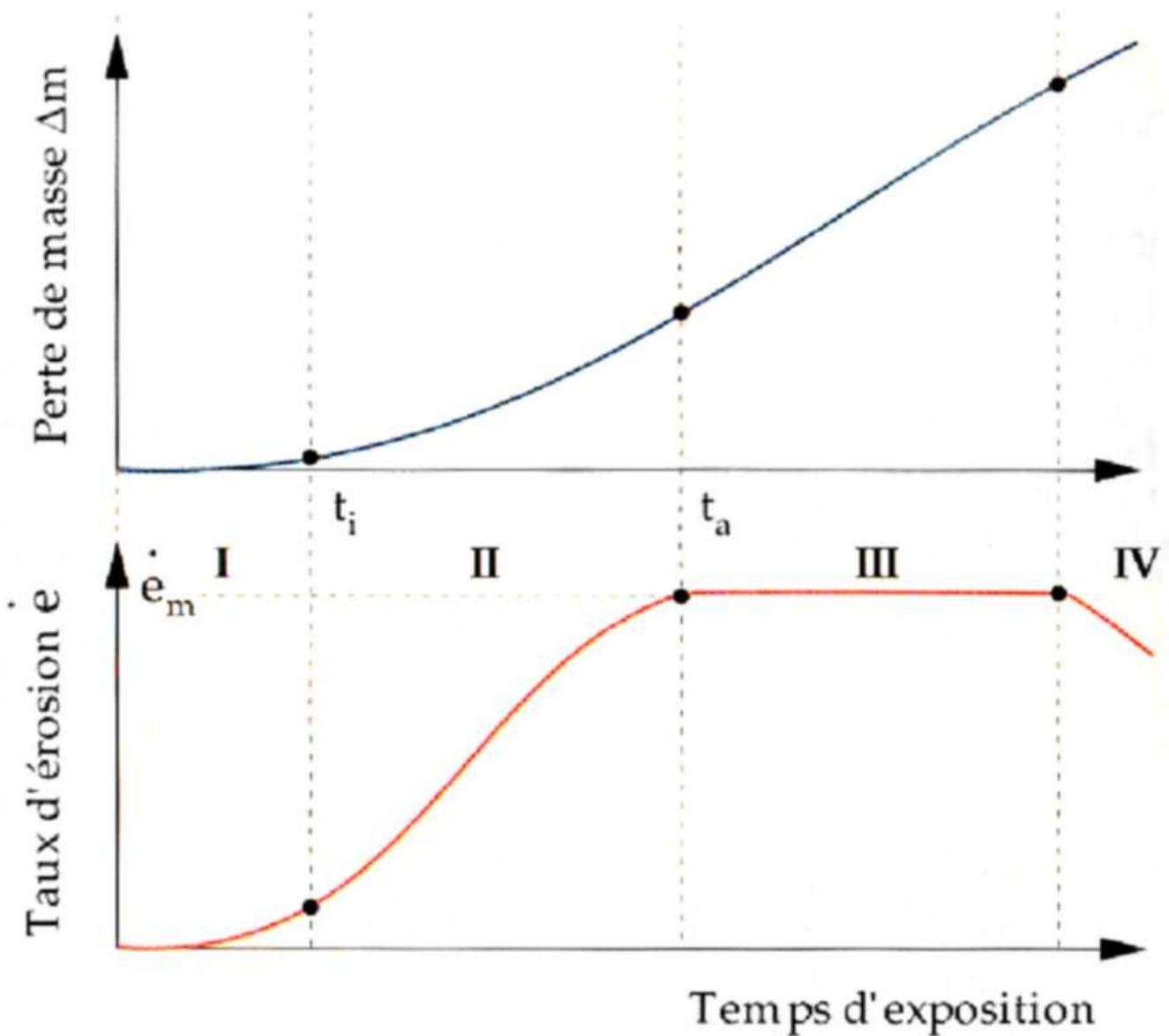


e. bronze d'aluminium



f. alliage Mn-Cu Sonoston

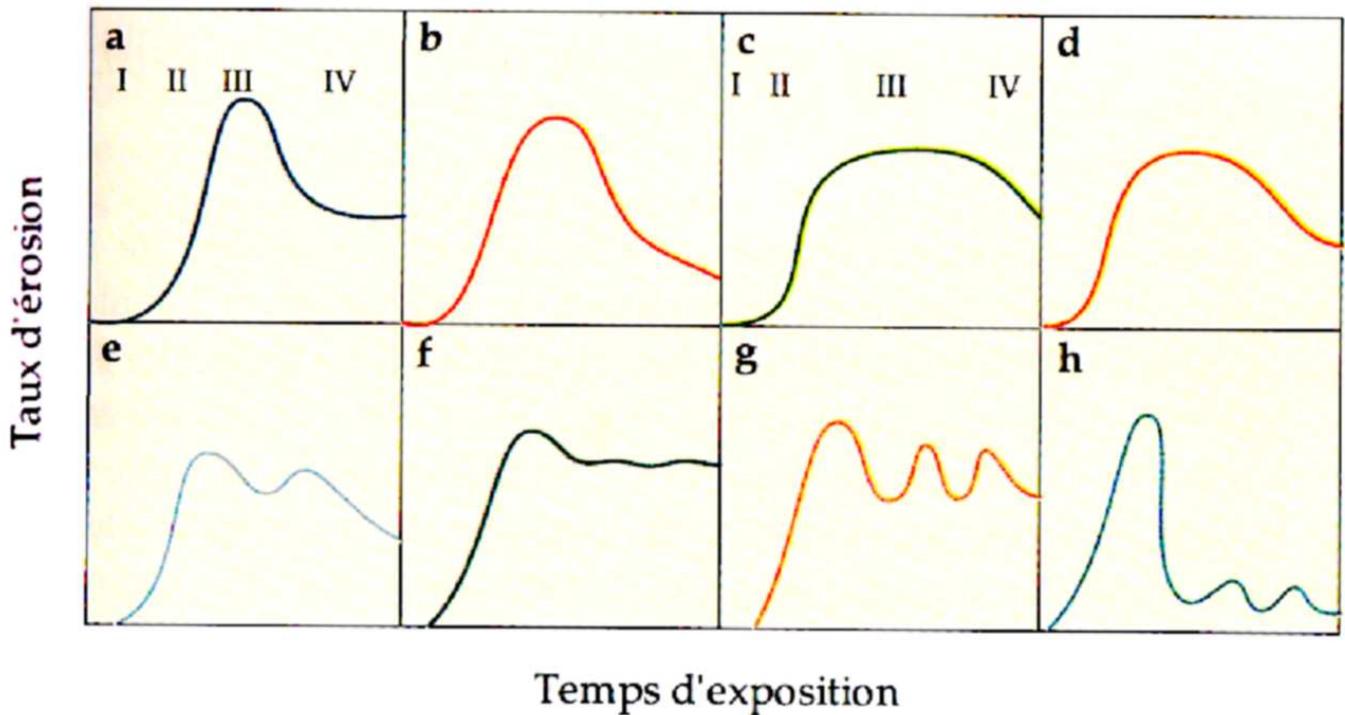
Allure idéale



Un phénomène non linéaire

- I : incubation
- II : accélération
- III : stationnaire
- IV : atténuation

Courbes réelles



Des courbes différentes

- I et II : restent similaires et monotones
- III : longue (c, d) ou pic (a, b)
- IV : stationnaire (a, d), décroissant (b, c) ou fluctuant (f, g, h)

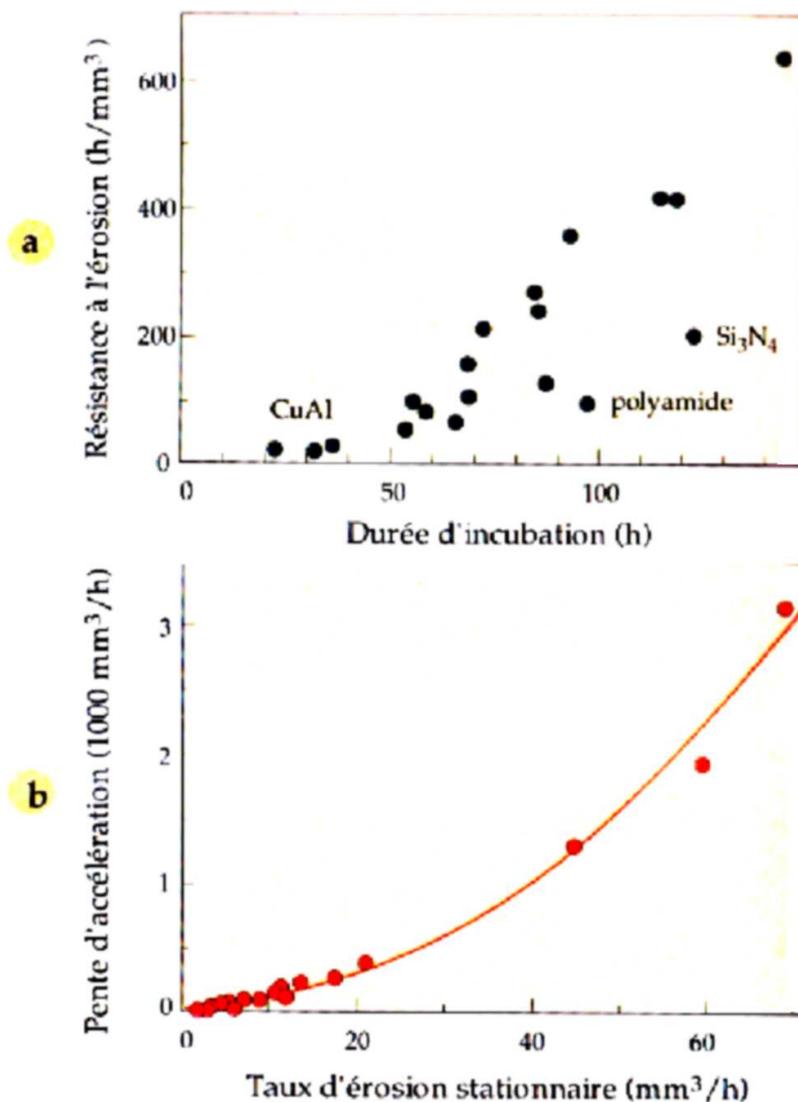
Conséquences

- III et IV : pourraient permettre de caractériser la réponse du matériau
- Recherche de relations entre les phases

Résultats expérimentaux

Grandeurs considérées

- Taux d'érosion stationnaire (III) : \dot{e}_m
- Résistance à l'érosion : $1/\dot{e}_m$
- Pente d'accélération : \dot{e}_m/t_a



Lien avec la dureté

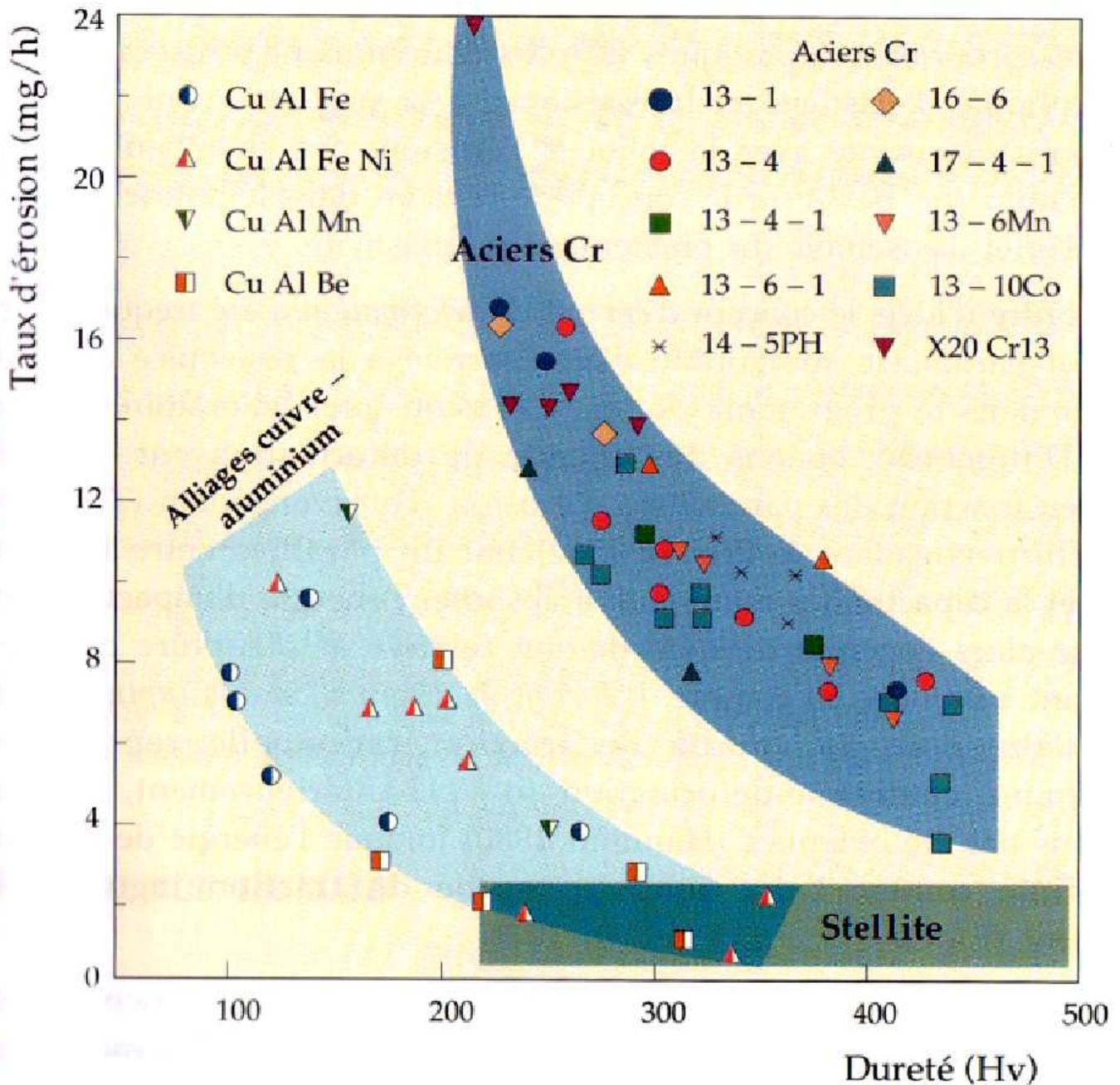
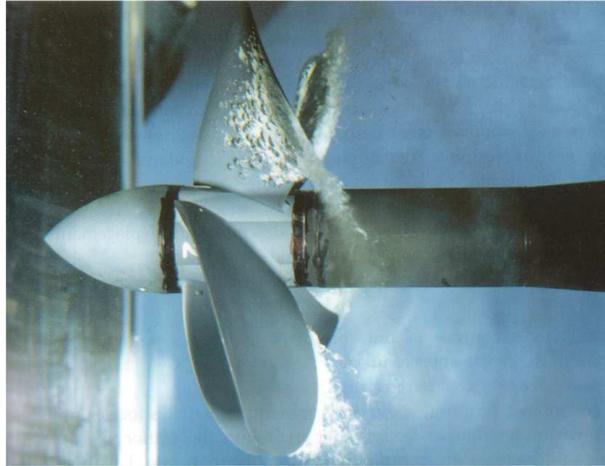


Figure: Relation entre le taux d'érosion et la dureté pour des aciers inoxydables, des alliages cuivre-aluminium et des stellites

Interprétation

- Une certaine corrélation au sein d'une famille
- Mais beaucoup de différences d'une famille à l'autre ⇒ peu de possibilités de généralisation

Conclusion



Deux échelles de temps différentes

- Implosion d'une bulle : phénomène très court et rapide (\approx milliseconde)
- Erosion : phénomène observable sur le long terme (\approx centaine d'heures)

Deux échelles de taille différentes

- Bulle, microjet, impact : \approx micromètre à millimètre
- Erosion d'une surface : perte de masse sur l'ensemble d'une pièce mécanique, perte de performances de la machine (\approx mètre)

Modélisation et prévision

- Difficiles et spécifiques à un matériau
- Toujours beaucoup de données expérimentales à connaître

La cavitation comme technique industrielle

- Nettoyage par ultrasons
- Destructions de tumeurs
- Supercavitation
- Imprimantes à jet d'encre

Bibliographie et netographie

La cavitation, mécanismes physiques et aspects industriels

J.P. Franc, F. Avellan, B. Belahadji, J.Y. Billard, L. Briançon-Marjollet, D. Fréchou, D.H. Fruman, A. Karimi, J.L. Kueny, J.M. Michel, Presses Universitaires de Grenoble, 1995
-> chapitres 1, 2, 3, 8

La cavitation - traqueurs de bulles

Yves Lecoffre, Ed. Hermès, 1994
-> chapitres 1, 2, 4, 6, 11, 15

Cavitation acoustique dans l'eau pure

Eric Herbert, thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 2006

Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation : mécanismes hydrodynamiques et prédiction

Mohamed Farhat, thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1994

Présentation d'une méthodologie systématique de mesure du début de cavitation

A. Mellion, J. Pauchet, S. Lavigne, 1993
[http : // website.ec —
nantes.fr / actesjh / images / 4JH / Annexe / 4_journee_Hydros2P5.pdf](http://website.ec-nantes.fr/actesjh/images/4JH/Annexe/4_journee_Hydros2P5.pdf)

Critère dynamique de cavitation par bulles

J.-Y. Billard, P. Cerrutti, Christian Dugué, 1991
[http : // website.ec —
nantes.fr / actesjh / images / 3JH / Annexe / Papier16.pdf](http://website.ec-nantes.fr/actesjh/images/3JH/Annexe/Papier16.pdf)