

# Résistance à l'érosion par cavitation de revêtements UHMWPE fritté et corrélation mécanique

T. Deplancke<sup>a</sup>, M. Fivel<sup>a</sup>, O. Lame<sup>b</sup>, J-Y. Cavaille<sup>b</sup>, J-P Franc<sup>c</sup>

a. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, SIMaP, F-38000 Grenoble, France  
[tiana.deplancke@gmail.com](mailto:tiana.deplancke@gmail.com) ; [marc.fivel@simap.grenoble-inp.fr](mailto:marc.fivel@simap.grenoble-inp.fr).

b. Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, MATEIS, UMR5510, F-69621 Villeurbanne,  
[olivier.lame@insa-lyon.fr](mailto:olivier.lame@insa-lyon.fr), [jean-yves.cavaille@insa-lyon.fr](mailto:jean-yves.cavaille@insa-lyon.fr).

c. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LEGI, F-38041 Grenoble, France  
[jean-pierre.franc@legi.cnrs.fr](mailto:jean-pierre.franc@legi.cnrs.fr).

## Résumé :

*La résistance à l'érosion par cavitation de revêtements UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) avec des masses moléculaires allant de 0.6 Mg/mol à 10.5 Mg/mol a été étudiée grâce à un tunnel hydrodynamique permettant d'atteindre une vitesse de 90 m/s. Ces revêtements ont été obtenus par frittage sur un substrat métallique texturé par EBM (Electron Beam Melting) permettant une adhésion mécanique. L'UHMWPE ayant une masse moléculaire de 10.5 Mg/mol a montré une exceptionnelle résistance à l'érosion par cavitation, bien supérieure à celle de l'acier inoxydable (SS A2205) ; contrairement au matériau de masse moléculaire 0.6 Mg/mol qui présente une résistance proche de celle des métaux conventionnels (en termes de profondeur d'érosion).*

*Pour expliquer ces différences de comportement, les UHMWPE de différentes masses moléculaires ont été caractérisés par compression à différentes vitesses de déformation allant du quasi statique ( $10^{-4} s^{-1}$ ) à une vitesse de déformation de  $2000 s^{-1}$  obtenue par barres de Hopkinson et en fatigue dans le domaine viscoélastique et viscoplastique. Les résultats de ces essais sont ensuite utilisés pour calibrer un modèle rhéologique élasto-viscoplastique de manière à quantifier les différentes contributions. La viscoélasticité plus importante dans le cas de la masse moléculaire la plus élevée est avancée comme une piste d'explications pour son exceptionnelle résistance à l'érosion par cavitation.*

## Abstract :

*The resistance to cavitation erosion of UHMWPE coatings (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) with different molecular weights ranging from 0.6 to 10.5 Mg/mol was tested in a hydrodynamic tunnel at a flow velocity of about 90 m/s. These coatings were obtained by sintering on a textured metal substrate by EBM (Electron Beam Melting) to ensure a mechanical interlocking. The UHMWPE with a molecular weight of 10.5 Mg/mol has an exceptional resistance to cavitation erosion, superior to that of stainless steel (SS A2205) whereas, UHMWPE with molecular weight 0.6 Mg/mol has a resistance to cavitation erosion similar to that of conventional metallic materials (in term of erosion depth). To explain these differences in behavior, the UHMWPE of different molecular weights were characterized by compression tests depending on the strain rate ranging from quasi-*

*static ( $10^{-4} s^{-1}$ ) to  $2000 s^{-1}$  obtained by Hopkinson bar tests and fatigue tests in the visco-elastic and visco-plastic field. The results of these tests are then used to calibrate an elastic-visco-plastic rheological model to quantify the various contributions. The largest viscoelasticity in the case of the higher molecular weight is put forward as an explanation for its outstanding resistance to cavitation erosion.*

**Mots clefs : UHMWPE, revêtement polymère, érosion par cavitation, essais de compression, Hopkinson, modèle rhéologique.**

## 1 Introduction

L'UHMWPE est connu pour son excellente résistance à l'usure ce qui explique son utilisation dans le domaine des prothèses articulaires. Il présente également une résistance aux chocs supérieure à la plupart des matériaux thermoplastiques. Ces propriétés exceptionnelles sont généralement expliquées par sa grande ductilité et sa grande déformation avant rupture (typiquement plusieurs centaines de pourcents) [1]. D'autres polymères semi-cristallins peuvent présenter des ductilités similaires, mais le UHMWPE avec une masse moléculaire supérieure à 3 Mg/mol est le seul pour lequel la déformation se propage sans striction s'expliquant probablement par une teneur extrêmement élevée de molécules liens [2,3].

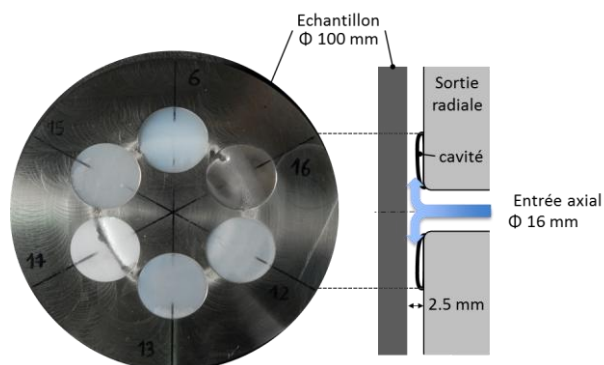
Par ailleurs, la longueur très importante des chaînes du UHMWPE lui confère une viscosité si forte à l'état fondu qu'il devient impossible d'utiliser les méthodes classiques de mise en œuvre et qu'une méthode inspirée de la métallurgie des poudres est alors utilisée, le frittage [1].

## 2 Résultats expérimentaux

### 2.1 Érosion par cavitation

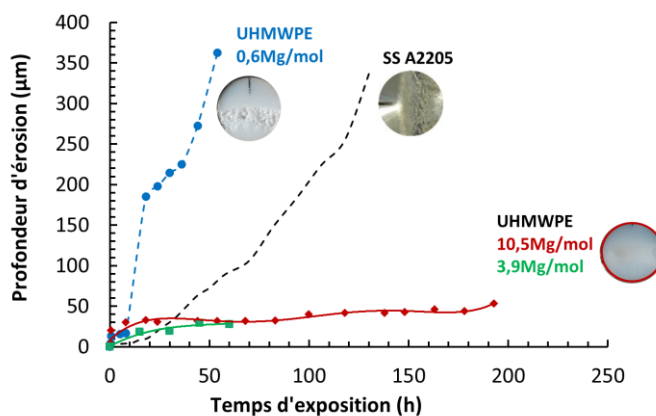
Dans un premier temps, de manière à contourner les problématiques d'adhérence polymère/substrat, les revêtements UHMWPE sont frittés directement sur un substrat métallique texturé par EBM (Electron Beam Melting). Le procédé EBM permet d'imprimer sur la surface du substrat un motif 3D d'arches favorisant une très bonne adhérence mécanique.

Les essais de cavitation ont été menés dans un tunnel hydrodynamique dont les caractéristiques sont présentées en détail dans les références [4,5]. Le but de l'installation est d'imiter l'érosion de cavitation qui se produit sur les aubages utilisés dans le domaine maritime. En effet, sur ces derniers, des cavités se forment dans les zones de basse pression puis celles-ci s'effondrent dans les zones de haute pression provoquant des jets de liquide à très hautes vitesses induisant une érosion mécanique. L'installation est conçue pour une pression de service maximale de 4 MPa. Cette pression relativement élevée conduit à des vitesses élevées de l'eau qui circule dans le tunnel de cavitation, et par conséquent, à un potentiel érosif élevé de l'écoulement cavitant. La section d'essai est axisymétrique et est constituée d'une buse de 16 mm de diamètre qui débouche sur un divergent et l'échantillon étudié (Figure 1). Des cavités se forment alors en sortie de la buse et s'effondrent à une distance de 2,5cm de l'axe, lorsque la vitesse de l'écoulement diminue. Plusieurs échantillons sont positionnés dans cette zone d'implosion des bulles de cavitation, permettant ainsi de tester simultanément plusieurs variétés de UHMWPE (Figure 1).



**Figure 1** : Schéma de la section d'essai du tunnel de cavitation et photos de six échantillons testés simultanément.

Les profondeurs d'érosion des échantillons en fonction du temps d'exposition sont ensuite mesurées en utilisant un profilomètre de contact avec une pointe de rayon  $2\ \mu\text{m}$  (Figure 2).

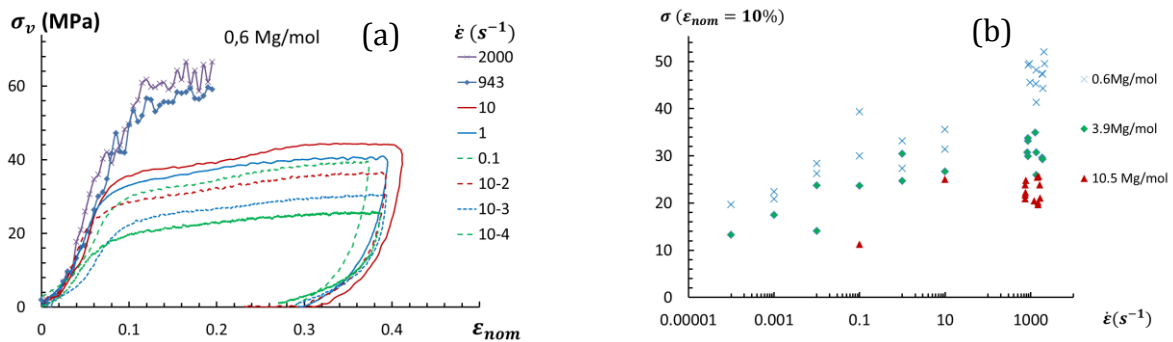


**Figure 2** : Cinétique d'érosion du UHMWPE, en termes de profondeur maximum d'érosion mesurée par profilométrie en fonction du temps d'exposition et comparaison avec un métal inoxydable (SS A2205).

Les mesures par profilomètre montrent, qu'après une période initiale d'érosion importante, la cinétique d'érosion des UHMWPE avec une masse moléculaire supérieure à  $3.9\text{Mg/mol}$  présente une saturation. Typiquement, dans le cas de la masse moléculaire de  $10.5\text{Mg/mol}$ , aucun dommage significatif n'est observé après un temps d'exposition de plus de 200 h.

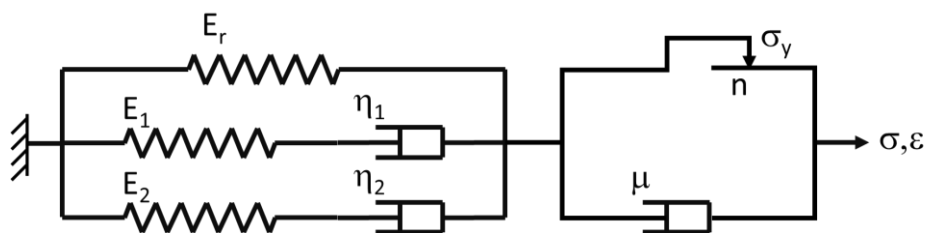
## 2.2 Caractérisation mécanique

Les échantillons de UHMWPE de différentes masses moléculaires ont été caractérisés par compression pour différentes vitesses de déformation allant de  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  à  $2000\text{s}^{-1}$ . Ces derniers, obtenus par barres d'Hopkinson, sont les plus représentatifs des vitesses de déformations réelles vues par l'échantillon lors des essais de cavitation.



**Figure 3 :** (a) Courbes contrainte/déformation dans le cas d'échantillons de masse moléculaire 0.6 Mg/mol frittés à 200 °C pendant 2 h allant du quasi statique (sur une machine de compression hydraulique MTS810) jusqu'à des essais par barres d'Hopkinson (effectués au PIMM par Nicolas Ranc), (b) contrainte relevée à 10 % de déformation en fonction de la vitesse de déformation pour différentes masses moléculaires.

Ces essais sont complétés par des essais de fatigue (sur 1000 cycles) dans le domaine viscoélastique ainsi que dans le domaine viscoplastique afin de calibrer un modèle rhéologique élasto-viscoplastique comme présenté dans la Figure 4.



**Figure 4 :** Représentation du modèle rhéologique élasto-viscoplastique utilisé.

Les premiers résultats montrent que plus la masse moléculaire est grande plus la contribution viscoélastique est importante. En revanche, pour la masse moléculaire la plus faible (0.6 Mg/mol), le matériau se déforme rapidement de manière viscoplastique ce qui pourrait expliquer les différences en termes de cinétique d'érosion. Ainsi, bien que les réponses en compression des deux nuances soient similaires, dans un cas le matériau reste essentiellement élastique alors que dans l'autre la plasticité apparaît de manière beaucoup plus forte, engendrant un endommagement plus fort.

## Références

- [1] Deplancke T. *et al.*, Diffusion versus Cocrystallization of Very Long Polymer Chains at Interfaces: Experimental Study of Sintering of UHMWPE Nascent Powder. *Macromolecules*, 2013. 47(1): p. 197-207.
- [2] Humbert S., Lame O., Vigier G., Polyethylene yielding behaviour : What is behind the correlation between yield stress and crystallinity? *Polymer*, 2009. 50(15): p. 3755-3761.
- [3] Bonten, C. *et al.*, A new hypothesis to describe the mechanisms acting in a welded joint of semicrystalline thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 2001. 41(3): p. 475-483.
- [4] Franc, J.-P., Incubation time and cavitation erosion rate of work-hardening materials. *Journal of fluids engineering*, 2009. 131(2): p. 021303.
- [5] Kim, K.-H., Chahine G, Franc J.-P. et Karimi A., *Advances Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction*. Fluid Mechanics and its Applications 2014: Springer.