

## DOUBLE DOCTORAL SUPERVISION AGREEMENT

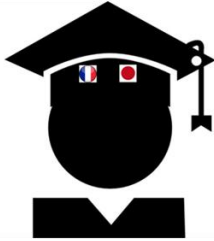
Between

École Centrale de Lyon

And

Graduate School of Engineering of Tohoku University

Student: Ms. Laura Jay




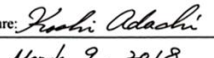
Ph.D. Supervisor  
Professor Hassan Zahouani



Ph.D. Supervisor  
Professor Koshi Adachi



Signature:   
Date: March 16, 2018

Signature:   
Date: March 9, 2018

### Running-in Control and Creation of Super Low Friction Interface in Water for Tribological System using Double Network Gel

- Prof. Koshi Adachi, Tohoku University
  - Prof. Tsunemoto Kuriyagawa, Tohoku University
  - Prof. Makoto Ohta, Tohoku University
  - Prof. Hassan Zahouani, Ecole Centrale de Lyon- ENISE
- Defense at Tohoku University, January 21, 2021
- Defense at Ecole Centrale de Lyon, March 15, 2021

## Running-in Control and Creation of Super Low Friction Interface in Water for Tribological System using Double Network Gel

Keywords: Hydrogel, DN gel, polymer, friction, wear

Over the past 20 years, hydrogels have been widely studied. This material has a large range of application due to its different properties and capacities. Hydrogels, thanks to their nearly 90 % of water, have atypical reservoirs or absorbent capacities. However, their resistance have been lacking. Recently a new generation of hydrogels was created making them much tougher. This technology consists of two interpenetrating polymers networks. It is called Double Network hydrogel or DN gel. This double network confers great shear, compressive and tensile stress resistance. Thus, this material can fit to more and more applications.

So far, studies focused on the mechanical properties of DN gel, however, depending on the different applications, tribological properties of this material must be investigate. Then, this Ph.D. work brings some keys in order to investigate the potential of Double Network hydrogel (DN gel) as a covering film for a low friction system application. The DN gel and SiC friction interface is understood and the cells support capacity of DN gel is also clarify.

DN gel basic tribological properties were determined. The capacity of DN gel film as a material creating a super low friction interface ( $\mu < 0.01$ ) was highlighted and our experiments allows to draw the Stribeck curve

of this material. Finally the run-in process during friction focused the attention and was understood to be the key for the low friction comprehension. Indeed by varying the thickness of the DN gel film, a lower friction coefficient is obtained by using a thick (6 mm) and a thin (1.5 mm) DN gel. Based on the qualitative aspect of the run-in period the mechanisms are found out to be different depending on the DN gel film thickness.

Complementary studies about the resulting wear on the DN gel surface and *in-situ* friction tests confirm and contribute to the understanding of the corresponding mechanisms.

Finally, for the bio application of this material as a support for cartilage self-regeneration, the DN gel material can easily be manageable to change its influent parameters on the growth of chondrocytes such as its elastic modulus and its surface texture.

## **Contrôle du processus permettant la création d'une interface de frottement extrêmement faible pour un système tribologique utilisant un DN gel**

Mots clés: Hydrogel, DN gel, polymère, frottement, usure

Les hydrogels ont suscité l'intérêt au cours des 20 dernières années. Grâce à ses propriétés et capacités hors norme, ce matériau répond à une large gamme d'applications. Composé à près de 90% d'eau, les hydrogels, ont des capacités de réserve et d'absorption atypiques. Cependant, leur résistance leur fait défaut. Récemment, une nouvelle génération d'hydrogels a été créée, les rendant beaucoup plus résistants, nommé l'hydrogel à double réseau ou le DN gel (de l'anglais « Double Network hydrogel »). Cette technologie est basée sur le principe d'interpénétration de deux réseaux de polymères. Ce double réseau lui confère une grande résistance au cisaillement, à la compression et à la traction ce qui permet à ce matériau de s'adapter à de plus en plus d'applications.

Jusqu'à présent les études se sont focalisées sur les propriétés mécaniques du DN gel, cependant, afin de répondre aux contraintes des différentes applications, les propriétés tribologiques de ce matériau doivent également être connues. Ce travail de thèse apporte quelques clés afin de comprendre le potentiel du DN gel en tant que film inter-matériau. Nous avons clarifié l'interface de frottement DN gel et Carbure de Silice (SiC), ainsi que les éléments caractéristiques du DN gel jouant un rôle dans la qualité de repousse cellulaire.

Dans un premier temps, les propriétés tribologiques de base du gel DN ont été déterminées. La capacité du DN gel à créer une interface à très faible frottement ( $\mu < 0,01$ ) a été mise en évidence, aussi, nos expériences nous ont permis de tracer la courbe de Stribeck. Enfin, nous nous sommes focalisés sur l'aspect qualitatif du processus transitoire tout au long de la durée du frottement, ce qui nous a permis de le considérer comme l'élément clé dans la compréhension de l'obtention d'un frottement aussi faible. En effet, en faisant varier l'épaisseur du film, nous obtenons un coefficient de frottement plus faible avec un gel épais (6 mm) ou fin (1,5 mm) suivant un processus à simple ou double décroissance pour l'atteindre, ce sont donc des mécanismes différents selon l'épaisseur et donc la pression appliquée sur le DN gel. Nous avons complété l'étude en analysant l'usure résultante à la surface du DN gel puis en effectuant des tests de frottement *in situ* complémentaires qui contribuent à la compréhension des mécanismes correspondants.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'application pour la régénération de tissu cartilagineux, notamment en utilisant le matériau directement comme support pour l'auto-régénération du cartilage. Pour cette application, nous avons compris que l'influence des paramètres tels que le module élastique

et la texture de surface du DN gel peuvent être des paramètres influents sur la qualité de croissance des chondrocytes.