



**HAL**  
open science

# Étude numérique et expérimentale du mécanisme de lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD)

Serguei Kunik

► **To cite this version:**

Serguei Kunik. Étude numérique et expérimentale du mécanisme de lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD). Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Poitiers, 2018. Français. NNT : 2018POIT2264 . tel-01997400

**HAL Id: tel-01997400**

**<https://theses.hal.science/tel-01997400>**

Submitted on 29 Jan 2019

**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.





“...Our fantastic civilization has fallen out of touch with many aspects of nature, and with none more completely than with night. Primitive folk, gathered at a cave mouth round a fire, do not fear night; they fear, rather, the energies and creatures to whom night gives power; we of the age of the machines, having delivered ourselves of nocturnal enemies, now have a dislike of night itself. With lights and ever more lights, we drive the holiness and beauty of night back to the forests and the sea; the little villages, the crossroads even, will have none of it. Are modern folk, perhaps, afraid of night? Do they fear that vast serenity, the mystery of infinite space, the austerity of stars? Having made themselves at home in a civilization obsessed with power, which explains its whole world in terms of energy, do they fear at night for their dull acquiescence and the pattern of their beliefs? Be the answer what it will, today's civilization is full of people who have not the slightest notion of the character or the poetry of night, who have never even seen night. Yet to live thus, to know only artificial night, is as absurd and evil as to know only artificial day...”

“...Do no dishonor to the earth lest you dishonor the spirit of man... Touch the earth, love the earth, her plains, her valleys, her hills, and her seas; rest your spirit in her solitary places. For the gifts of life are the earth's and they are given to all, and they are the songs of birds at daybreak, Orion and the Bear, and the dawn seen over the ocean from the beach...”

**Henry Beston, “*The Outermost House: A Year of Life On The Great Beach of Cape Cod*”**



# Table des matières

Avant-propos .....	7
Introduction .....	9
I. Étude bibliographique .....	13
I.1. Définition du milieu poreux .....	13
I.2. Paramètres caractéristiques du matériau poreux .....	16
I.3. Mesures de la perméabilité .....	20
I.4. Modèles de variation de la perméabilité en fonction de la porosité .....	25
I.5. Modèles d'écoulement dans un milieu poreux .....	29
I.6. Lubrification Ex-Poro-HydroDynamique (XPHD) .....	31
I.7. Conclusion et but de cette étude .....	38
II. Caractérisation des matériaux poreux .....	41
II.1. Observation au microscope .....	42
II.2. Principes des mesures de porosité .....	43
II.2.1. Mesures de porosité par imbibition de mousse .....	43
II.2.2. Mesure de la porosité par tomographie à rayons X .....	45
II.2.3. Mesure de la porosité d'une mousse comprimée par tomographie à rayons X .....	50
II.2.4. Bilan des mesures de la porosité .....	51
II.3. Principes des mesures de la perméabilité .....	52
II.3.1. Observation d'écoulement au sein de la mousse à l'échelle microscopique .....	53
II.3.2. Mesures de la perméabilité avec le perméamètre longitudinal .....	57
II.3.2.1. Mesures de la perméabilité à l'eau avec le perméamètre longitudinal .....	57
II.3.2.2. Mesures de la perméabilité à l'huile avec le perméamètre longitudinal .....	61
II.3.2.3. Résultats expérimentaux des mesures de perméabilité avec le perméamètre longitudinal. Comparaison avec des résultats de modélisation .....	66
II.4. Caractéristiques mécaniques de la mousse de polyuréthane .....	75
III. Étude expérimentale de la lubrification XPHD et comparaison avec des résultats de modélisation .....	81

III.1. Description du banc d'essais de butées XPHD .....	81
III.2. Préparation du banc d'essais XPHD et procédure d'essais .....	87
III.3. Résultats expérimentaux .....	88
III.3.1. Résultats expérimentaux : essais en mode «géométrie imposée» avec différents types de liquides et le dislocateur initial .....	89
III.3.2. Résultats expérimentaux : essais en mode «charge imposée» avec le dislocateur initial .....	94
III.3.3. Résultats expérimentaux : essais en mode «géométrie imposée» avec les trois types de dislocateurs .....	99
III.3.4. Résultats expérimentaux : usure de la mousse .....	104
III.4. Modèle de lubrification XPHD .....	106
III.5. Validation du modèle de lubrification XPHD par comparaison avec un modèle CFD .....	109
III.6. Comparaison des résultats expérimentaux avec la modélisation .....	113
IV. Conclusions et perspectives .....	117
Nomenclature .....	121
Annexe 1 .....	123
Annexe 2 .....	125
Annexe 3 .....	127
Annexe 4 .....	129
Annexe 5 .....	133
Annexe 6 .....	135
Annexe 7 .....	137
Références .....	139

# Avant-propos

Ce travail de recherche fut réalisé au sein de l'Institut PPRIME (UPR CNRS 3346), dans le Département Génie Mécanique et Systèmes Complexes, et plus précisément dans l'axe Mécanique des Interfaces Lubrifiées (TriboLub).

Tout d'abord je voudrais remercier Monsieur Mihaï ARGHIR de m'avoir ouvert les portes de ce laboratoire de recherche durant mon stage de Mastère Spécialisé et avec qui j'ai fait mes premiers pas dans le domaine de la tribologie.

Mes sincères reconnaissances s'adressent surtout à mes Directeurs de thèse Monsieur Aurelian FATU et Monsieur Jean BOUYER, pour le suivi de cette étude. Leurs conseils avisés et leurs encouragements, leur humour et leur énergie positive m'ont été d'une grande aide tout au long de ma thèse.

Je voudrais remercier tout spécialement Monsieur Mohamed HAJJAM pour ses conseils et remarques pertinents concernant ce travail de recherche, sa disponibilité, ainsi que pour nos conversations sur les sujets scientifiques et relationnels.

Je suis également très touché par le fait que Monsieur Mircea D. PASCOVICI, Professeur Émérite à l'Université «Politehnica» de Bucarest, ait accepté de juger ce travail, lui qui m'encouragea par son enthousiasme et son intérêt porté à ce travail, de même que pour nos échanges fructueux concernant les dispositifs expérimentaux.

Je tiens à exprimer mes gratitudes à nos collègues de l'Institut PPRIME, Messieurs Sébastien JARNY et Pascal DOUMALIN, pour leur disponibilité et leur aide sur une partie non négligeable de ce travail de recherche.

Un grand merci également à Messieurs Traian CICONE, Professeur à l'Université «Politehnica» de Bucarest et Benyebka BOU-SAÏD, Professeur de l'INSA de Lyon, d'avoir accepté de juger ce travail.

J'apprécie également l'honneur que me fait Monsieur Didier LASSEUX, Directeur de recherche à l'Institut de mécanique et d'ingénierie (I2M) de Bordeaux, mais aussi Madame Antoinette BLOUIN, Maître de conférences à l'Université de Poitiers, d'avoir accepté de participer au jury.

Je tiens à remercier vivement Messieurs Noël BRUNETIERE, Pascal JOLLY, Michel FILLON, Arthur FRANCISCO et Yann HENRY, pour leurs propositions et leurs conseils, ainsi que leur disponibilité à répondre à mes questions.

Je remercie Monsieur Dominique SOUCHET, en tant qu'encadrant de mon service d'enseignement à l'IUT d'Angoulême, pour sa présence, son aide et son soutien.

Un grand merci à tous les membres du laboratoire, au personnel administratif et technique du côté du Futuroscope ainsi qu'à Angoulême, pour leur aide, leur présence et patience ; ils n'ont jamais hésité à répondre à mes besoins.

Il m'est très agréable de remercier chaleureusement tous mes collègues doctorant(e)s, ceux qui ont déjà fini et ceux qui sont encore en thèse, pour leurs sourires, leur amitié et les moments conviviaux que nous avons passés ensemble.

Enfin, je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer tout au long de cette thèse et qui ont laissé une trace inoubliable dans ma mémoire.

MERCI ;-)

# Introduction

Il est connu que la **tribologie** est une science qui étudie les phénomènes qui se produisent entre deux systèmes matériels en contact. Le nom tribologie fut utilisé pour la première fois en 1966 et vient du grec ancien *τρίβος* [trí.bos] (frottement) et *λόγος* [lógos] (science, étude). Dans un sens plus général, la tribologie regroupe l'étude de la lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine.

À partir de la seconde moitié du XXe siècle, la fiabilité, les qualités économiques et écologiques des machines, des appareils et des équipements tribologiques sont déterminées non seulement par des indicateurs de robustesse mais de plus en plus par les performances tribologiques des pièces et des composants travaillant avec de la friction. Il est évident que le rôle de ces indicateurs tribologiques augmentera encore plus durant le XXIe siècle. Par conséquent, les phénomènes tribologiques devraient être pris en compte dès l'étape de la conception avant l'exploitation des machines et des mécanismes.

L'analyse réalisée par le Conseil international de tribologie montre que pour un cycle complet de fonctionnement, les coûts d'exploitation, de réparation et des pièces de rechange des machines et des mécanismes peuvent être supérieurs aux coûts de fabrication d'un nouveau mécanisme [i1]. En général, les pertes liées au frottement et à l'usure des machines sont estimées à 3-5% du produit intérieur brut. De plus, on peut noter que environ un quart de l'apport énergétique dans l'industrie est dépensé pour surmonter les pertes dues au frottement.

En même temps, le coût des composants tribologiques représente souvent une très faible partie du coût total de produit final. Cependant, le fonctionnement correct et fiable de ces composants peut avoir un impact significatif sur l'efficacité et en particulier sur la durée de vie des mécanismes. Un exemple éloquent confirmant les aspects exposés auparavant est donné ci-après.

La sonde spatiale américaine Galileo fut lancée à partir de la navette spatiale Atlantis en 1989. L'un des composants les plus importants était une antenne de type parapluie (de 4,8 mètres de diamètre) à grand gain qui fut fermée pendant le lancement. En 1991, cette antenne ne fut que partiellement déployée. Il fut conclu que quatre des 18 baleines de l'antenne étaient bloquées. Grâce aux essais et modélisations effectués au sol, il fut déterminé que les barres de guidages en alliage du titane (Ti-6Al-4V) placées à mi-longueur de baleine furent bloquées dans leurs logements à cause du grippage provoqué par la perte du lubrifiant à base de disulfure de molybdène (MoS<sub>2</sub>) dans la zone du contact. La mission ne fut sauvée que grâce à l'utilisation de l'antenne à faible gain et aux progrès de la technologie de transmission de données. Par conséquent, la mission ne put atteindre que 70% de ses objectifs scientifiques [i2]. Comme nous pouvons le constater, quelques problèmes tribologiques qui peuvent paraître mineurs suffirent à mettre toute la mission spatiale en péril!

La tribologie, comme tous les autres domaines de la science, évolua avec le temps. Le développement de l'humanité pose encore de nouveaux problèmes pour les scientifiques et les ingénieurs. En mars 2016, le monde de la tribologie célébra une date remarquable – le 50<sup>ième</sup> anniversaire de la publication du rapport sur les problèmes de frottement, usure et lubrification préparé par le Professeur Peter Jost qui est lui-même le créateur du mot «tribologie». Un séminaire fut organisé à cette occasion par Institution of Mechanical

Engineers (Londres, Royaume-Uni) pour être une plate-forme de discussion et d'échange sur les problèmes, les progrès atteints et bien sûr les tendances et perspectives de la tribologie [i3].

Ainsi, les tendances fortement soulignées concernaient le développement des nanotechnologies, de la biotribologie et de la «tribologie verte». Cette dernière s'appuie sur les domaines qui permettent de créer des systèmes tribologique écologiques en s'inspirant de la nature avec un rendement proche de celui des ensembles biologiques naturels. Autrement dit, en s'appuyant sur les méthodes du biomimétisme, il est possible de développer des tribosystèmes quasi parfaits qui peuvent fonctionner sans usure pendant plusieurs années.

Le terme «**biomimétisme**» vient du grec, *βίος* [bíos] (vie) et *μίμησις* [mímêsis] (imitation) et fut inventé par Otto Herbert Arnold Schmitt. Au sens général, le biomimétisme est un processus d'innovation et une ingénierie qui s'inspire des formes, matières, propriétés et fonctions du vivant. Les idées et les éléments de base des dispositifs technologiques développés grâce à cette méthode sont «empruntés» à la nature. Cependant, le concept d'utiliser des idées et des principes de la nature dans les mécanismes technologiques n'est pas très innovant. L'histoire de la science et de l'ingénierie connaît une large palette d'inventeurs qui utilisèrent cette technique. On donne ci-dessous quelques exemples significatifs.

En 1485, Léonarde De Vinci, inspiré par des vols d'oiseaux et par la structure de leurs ailes, dessina les tous premiers plans de machines volantes à battement d'ailes fonctionnant grâce à l'énergie musculaire. En 1801, un autre pionnier de l'aviation et précurseur du deltaplane, angevois, le général André Guillaume Resnier de Goué, toujours inspiré par le vol des oiseaux, se lança des Remparts de la ville d'Angoulême pour le premier vol humain de l'histoire équipé des ailes battantes improvisées. Il plana sur 300 mètres avant d'atterrir sur la berge de la Charente. Bien sûr, on mentionne ici Clément Agnès Ader et son «avion-chauvesouris», premier avion motorisé au monde, dont la structure fut inspirée de l'anatomie des mammifères volants.

En partant de l'air pour aller vers l'environnement aqueux, on trouve des exemples de biomimétisme tout aussi surprenants. Les palmes de plongée telles que nous les connaissons actuellement furent inventées par le capitaine de corvette Louis de Corlieu en 1914. La forme des palmes imite celle des membres de certains animaux qui en sont munis naturellement, comme par exemple la grenouille. En 1945, Jacques-Yves Cousteau et Émile Gagnan brevetèrent un «détendeur à la demande CG45» pour la plongée autonome. Il peut paraître que cette invention du Commandant Cousteau est un mécanisme purement technique et qui n'a aucun rapport avec le biomimétisme, mais le principe de fonctionnement du détendeur fut en fait emprunté à des habitats de l'océan : «Au lieu d'avoir de l'air qui arrive dans le masque, mais soit trop, soit insuffisamment, le détendeur ne fonctionne que lorsqu'on inspire» expliqua Jean-Luc Diainville, PDG d'Aqua Lung France [i4].

Cet excursus dans la tribologie et le biomimétisme n'est pas fait au hasard : le sujet de ce travail de recherche se trouve au croisement de ces deux domaines des sciences, l'un purement technologique et l'autre inspiré de la nature.

**La lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD)**, thème de ce mémoire, est donc un mécanisme de lubrification d'inspiration biomimétique qui fut initialement inventé à l'Université Polytechnique de Bucarest par le Professeur Mircea D. Pascovici. Il s'agit essentiellement d'un écoulement dans un milieu poreux dont la phase solide induit des forces

élastiques de compression négligeables par rapport aux forces hydrodynamiques générées à l'intérieur du milieu. Dans la nature, il existe une grande variété de structures conduisant à la réalisation de ce type de strates : la neige fraîchement tombée, les plumages des oiseaux, les couches endothéliales de glycocalyx qui tapissent les vaisseaux sanguins et plus particulièrement les capillaires, le cartilage articulaire, etc.

La lubrification XPHD est un sujet de recherche innovant inter- et multidisciplinaire qui propose une solution de glissement prometteuse pour diverses applications, telles que les paliers, les butées, les différents organes de guidage, etc. L'idée essentielle de ce projet consiste à remplacer le matériau antifriction et le film de fluide mince, traditionnellement utilisé dans les solutions classiques, par une couche poreuse imbibée d'un fluide qui fournit une plus grande capacité de charge et de bonnes propriétés de frottement. Le milieu poreux imbibé de lubrifiant joue le rôle d'un manchon utilisé dans les applications classiques. Les deux principaux composants (la structure solide et le fluide) peuvent être des matériaux écologiques. Ceci représente une solution technologique totalement nouvelle (en rupture avec la solution classique) qui peut remplacer les lubrifiants pétroliers, connus comme des liquides non respectueux envers l'environnement, potentiellement toxiques pour l'homme. Ces nouvelles solutions peuvent aussi permettre de créer des systèmes autolubrifiants, sans nécessité d'avoir des moyens apportant du lubrifiant dans la zone du contact sous haute pression. En même temps, il n'y a quasiment aucune restriction importante pour les matériaux poreux ainsi que pour les liquides, de sorte que des solutions à faible impact écologique peuvent être utilisées. Le recyclage des matériaux poreux ou des fluides à base d'eau sera également assuré, et les matériaux poreux eux-mêmes peuvent être obtenus par recyclage. Les fluides de lubrification et les matériaux poreux peuvent ainsi être considérés comme une solution peu coûteuse et éco-efficace.

Le développement de l'approche numérique multi-physique et multi-échelles de la lubrification XPHD permettra d'explorer une large gamme de candidats des matériaux poreux pour diverses applications tribologiques. De cette façon, la compétitivité des différents secteurs industriels peut stimuler la production des nouveaux produits de haute performance basés sur le concept XPHD.

Enfin, il est important de souligner que la lubrification XPHD ne fut jamais étudiée auparavant dans un centre de recherche français. Ce sujet de recherche aura donc une importance stratégique et donnera aux partenaires français et internationaux la possibilité d'acquérir de nouvelles expertises en travaillant avec les initiateurs du sujet de la lubrification XPHD.

Le travail effectué est présenté en trois parties principales : la première est une bibliographie, la seconde présente l'étude des caractéristiques des matériaux poreux et la suivante une étude expérimentale de la lubrification XPHD et une comparaison avec des résultats de modélisation numérique. Le mémoire se termine par les conclusions et les perspectives de ce travail. L'étude bibliographique retrace les notions essentielles du milieu poreux et de la lubrification XPHD, les paramètres caractéristiques et les modèles d'écoulement dans un milieu poreux ainsi que les travaux effectués dans le domaine de l'application XPHD.

Le deuxième chapitre est concentré sur la caractérisation du matériau poreux pré-chois. En particulier, les techniques, méthodes et dispositifs expérimentaux utilisés pour

mesurer la porosité et la perméabilité du milieu poreux sont présentés. Les propriétés mécaniques des échantillons sont présentées via des essais de compression. Les modèles analytiques utilisés pour déterminer la perméabilité du matériau poreux aussi que les résultats expérimentaux sont également traités.

Le chapitre trois donne les détails des études expérimentale et numérique de la lubrification XPHD. Après une description du banc d'essais de butées XPHD et de la procédure des essais, les résultats expérimentaux des essais ainsi que l'usure du matériau poreux sont analysés. Le modèle de lubrification XPHD développé dans notre laboratoire, les hypothèses prises en compte et les particularités de ce modèle sont ensuite pareillement présentés. Enfin, la comparaison des résultats de modélisation numérique avec des résultats expérimentaux pour trois types de dislocateur termine ce chapitre.

Enfin, la dernière partie présente les conclusions et les perspectives de ce travail de recherche.

# Chapitre I

## Étude bibliographique

La lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD) est le sujet principal de ce travail de recherche mais la compréhension de son principe de fonctionnement ainsi que des phénomènes physiques sous-jacents à la base de ce type de lubrification innovante nécessite d'avoir tout d'abord une connaissance profonde des milieux poreux. Cette première partie s'attache donc à décrire ce type de milieu et donner un certain nombre de caractéristiques le concernant, tant physiques que lexicales. Nous commencerons par la définition du milieu poreux puis de ses caractéristiques. Nous verrons ensuite comment ces différentes caractéristiques ont été abordées tant expérimentalement que théoriquement. Enfin, nous terminerons par une conclusion et mentionnerons le but de cette étude.

### I.1. Définition du milieu poreux

**Lato sensu**, un milieu poreux peut être considéré comme un corps solide qui contient des vides à l'intérieur. Dans ce cas-là, sans aucune exagération, un simple objet creux peut être considéré comme un exemple «classique» de matériau poreux. Néanmoins, dans le cadre de notre recherche ce cheminement de la pensée est incorrect et nous avons besoin d'avoir une notion plus appropriée et plus claire. **Stricto sensu**, le milieu poreux présente un corps solide contenant une quantité suffisante de vides répartis de manière ordonnée ou chaotique, connectés ou non-connectés entre eux [1].

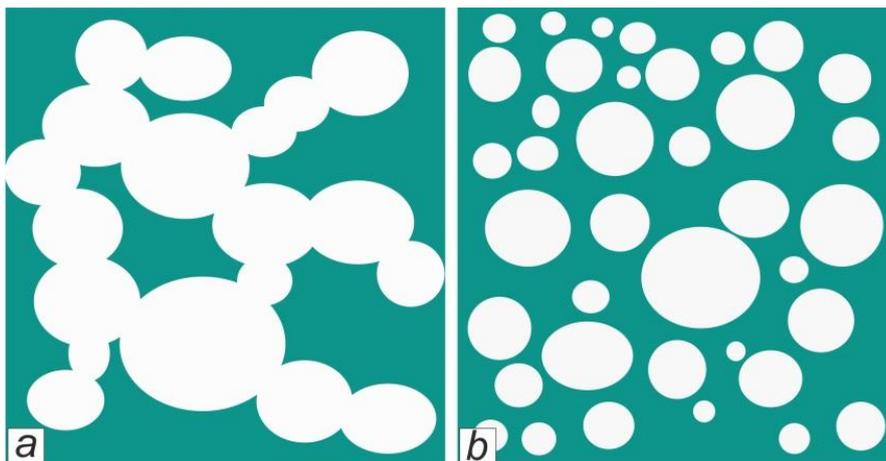


Figure 1-1. Structure des vides dans un milieu poreux.

Il est donc important de classer les vides et de déterminer la définition des pores. Les formes et les tailles des vides sont très variées, mais si on se base sur le comportement du liquide à l'intérieur du milieu poreux, il est possible de distinguer trois principaux groupes de vides [2]. Dans les plus petits vides les forces intermoléculaires entre la paroi et un liquide

sont très élevées. On appelle ces vides les **pores moléculaires**. Dans les plus grands vides, le mouvement du liquide est partiellement déterminé par l'interaction avec la partie solide. Ceux-ci se nomment **les cavernes**. Enfin les vides qui occupent la position intermédiaire entre ces deux premiers types de vides représentent tout simplement **les pores**. Les pores peuvent être soit connectés, (Figure 1-1a) soit non-connectés (Figure 1-1b).

L'écoulement du fluide dans un milieu poreux n'est possible que lorsqu'au moins une partie des pores communiquent entre eux. Les pores connectés représentent un espace poreux actif, et l'ensemble des pores dans un milieu poreux compose l'espace poreux total.

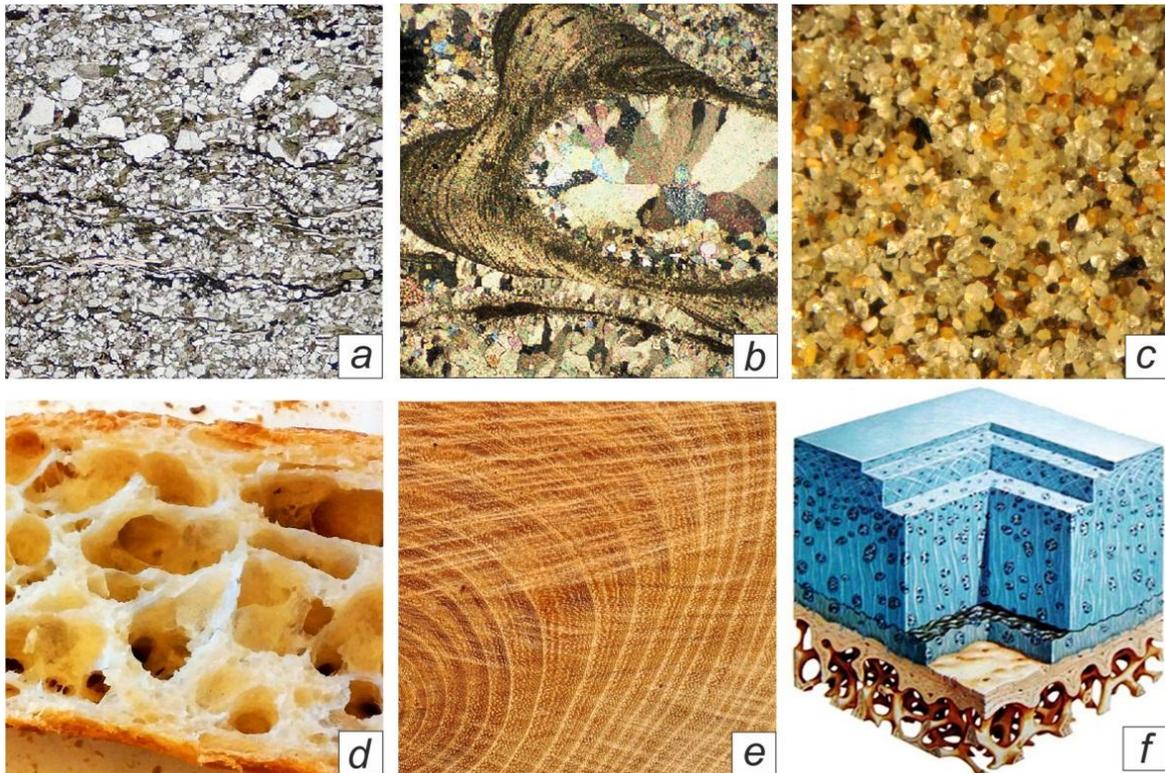
De point de vue de la structure du matériau formant la partie solide du milieu poreux, il est possible de faire la classification suivante :

- ❖ **le matériau granulaire** – un matériau constitué d'un grand nombre de particules solides distinctes (les grains) qui ne sont pas liés par des liaisons chimiques ;
- ❖ **le matériau cellulaire** – un matériau dont la partie solide forme des cellules distinctes ouvertes ou fermées qui sont distribuées de manière relativement régulière ;
- ❖ **le matériau fibreux** – un matériau dont la matière solide est constituée de fibres plus ou moins enchevêtrées les unes dans les autres et agglomérées par un liant.

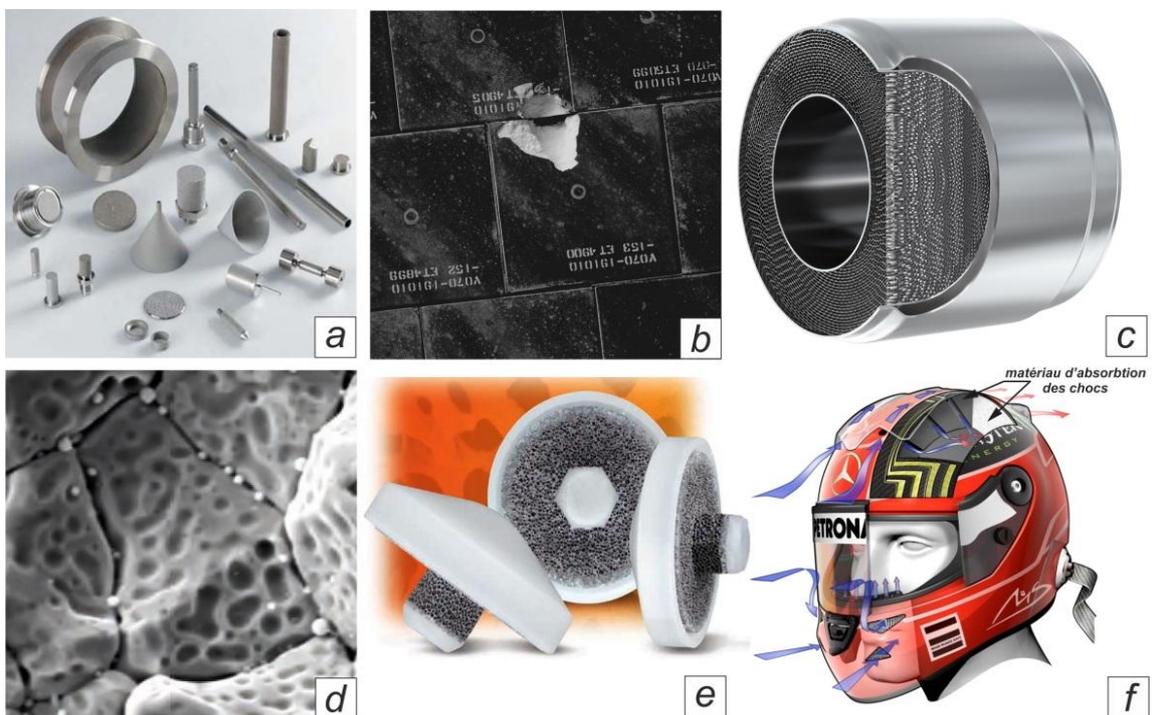
Les matériaux poreux sont largement représentés dans la nature comme dans notre vie quotidienne. Quelques exemples de ce type des strates naturelles et artificielles sont présentés sur la Figure 1-2. Les roches et les sols sont certainement les milieux poreux les plus exploités par l'homme. Le bois qui est également utilisé depuis longtemps pour la construction ou le chauffage de la demeure. Ou encore un exemple simple : le pain, celui-ci qu'on voit chaque jour sur notre table – croustillant à l'extérieur et mou à l'intérieur. Si on l'observe dans le contexte de notre recherche, le pain représente ni plus ni moins un matériau poreux cellulaire avec des pores désordonnés (Figure 1-2 d).

En dirigeant son regard vers le monde technique on s'aperçoit de l'utilisation ubiquitaire des milieux poreux dans différents domaines. Dans la Figure 1-3, on découvre quelques exemples :

- ❖ Aéronautique et spatial (filtres et différentes pièces pour les systèmes hydrauliques et d'alimentation en carburant, éléments de protection thermique, différents éléments de la structure, etc.) – Figure 1-3a, b ;
- ❖ Industrie automobile (filtres, catalyseurs, éléments d'absorption des chocs etc.) – Figure 1-3c ;
- ❖ Energie et utilisation de ressources naturelles (réacteurs, combustible nucléaire, énergie géothermique, énergie solaire, hydrologie des eaux souterraines, etc.) – Figure 1-3d ;
- ❖ Médecine et bio-ingénierie (prothèses, matériaux de régénération osseuse, production pharmaceutique, etc.) – Figure 1-3e ;
- ❖ Construction (matériaux de construction, membranes d'étanchéité, isolation thermique des bâtiments, etc.) ;
- ❖ Production d'équipements et vêtements sportifs (chaussures de sport, casques, textiles high-tech, etc.) – Figure 1-3f.



**Figure 1-2.** Exemples des matériaux poreux naturels : a) grès [3], b) calcaire [3], c) sable des plages [3], d) pain, e) bois, f) cartilage articulaire [4].



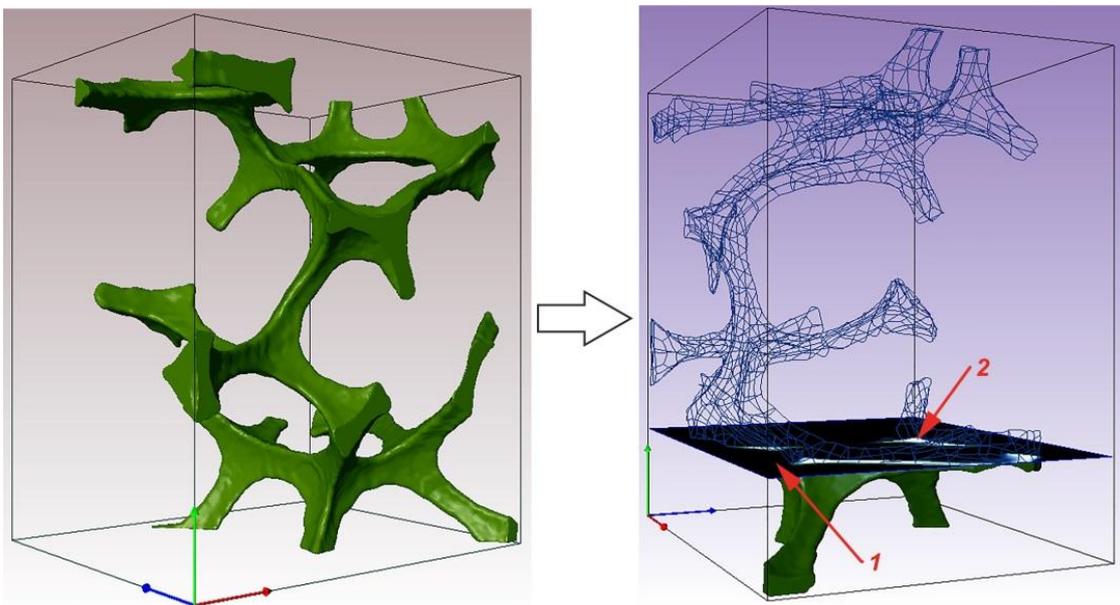
**Figure 1-3.** Exemples d'application de matériaux poreux en industrie : a) pièces pour l'aérospatial [5], b) panneaux ablatifs de protection thermique d'une navette spatiale [6], c) catalyseur catalytique annulaire [7], d) combustible nucléaire à base d'uranium [8], e) prothèse rotulienne [9], f) casque de pilote de Formule 1 [10].

## I.2. Paramètres caractéristiques du matériau poreux

L'un des principaux paramètres décrivant un milieu poreux est la **porosité**  $\varepsilon$ . Ce paramètre est défini par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t}, \quad (1.1)$$

où  $V_p$  est le volume des pores et  $V_t$  le volume total. La porosité peut varier dans la plage  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , où les valeurs extrêmes correspondent respectivement au solide plein et au volume complètement vide. La porosité calculée seulement à partir de l'espace poreux interconnecté est appelée la porosité effective [11].



**Figure 1-4.** Exemple d'une coupe transversale d'une mousse en polyuréthane : 1 – surface occupée par des pores (noir), 2 – phase solide (blanc).

En général, la notion de porosité est une notion tridimensionnelle, mais elle peut aussi se présenter dans le domaine bidimensionnel. Si on prend une section d'un échantillon d'un matériau poreux, on découvre une surface biphase : avec une phase solide et une «phase des pores», constituée de vides (Figure 1-4). Dans ce cas, on définit la porosité surfacique comme :

$$\varepsilon_s = \frac{A_p}{A_t}, \quad (1.2)$$

avec  $A_p$  la surface des pores et  $A_t$  la surface totale.

En fonction de la taille des pores, plusieurs porosités peuvent être distinguées [32] :

- ❖ **La microporosité**, correspondant aux pores dont le diamètre ne dépasse pas 2 nm ;
- ❖ **La mésoporosité**, correspondant aux pores dont le diamètre est compris entre 2 et 50 nm ;
- ❖ **La macroporosité**, concernant les pores dont le diamètre est supérieur à 50 nm.

En règle générale, la porosité des milieux poreux naturels ne dépasse pas la valeur 0,6 par contre, la porosité des matériaux poreux artificiels peut atteindre des valeurs qui sont très proches de 1 [11]. Le Tableau 1-1 montre la variation de la porosité pour différents matériaux.

**Tableau 1-1.** Porosité des matériaux poreux, d'après Nield et Bejan [11].

Matériaux	Porosité $\varepsilon$
Poudre d'ardoise noir	0,57 – 0,66
Brique	0,12 – 0,34
Béton (bitumineux)	0,1
Poudre de cuivre (compacté à chaud)	0,09 – 0,34
Verre fibreux	0,88 – 0,93
Roche granulaire concassé	0,45
Cheveux (mammifères)	0,95 – 0,99
Cuir	0,56 – 0,59
Calcaire (dolomite)	0,04 – 0,10
Sable	0,37 – 0,50
Grès	0,08 – 0,38
Grains de silice	0,65
Poudre de silice	0,37 – 0,49
Sol	0,43 – 0,54

Pour déterminer la porosité des matériaux poreux, il existe différentes méthodes expérimentales. Toutes ces méthodes ont pour but de mesurer le volume des pores et le volume total afin de déterminer le rapport entre eux. Nous présentons ci-dessous les méthodes les plus notoires [1, 2] :

1. **Méthode directe** : consiste à mesurer la différence entre le volume total d'un échantillon et le volume de celui-ci après la compression totale. Il n'est applicable que pour les matériaux poreux souples.
2. **Méthode optique** : prévoit l'observation des sections d'un milieu poreux au microscope. Sachant que la porosité surfacique pour une section aléatoire doit être la même que celle du milieu poreux, on obtient la valeur de la porosité.
3. **Méthode qui se base sur les mesures de la densité** : cette méthode se fonde sur une relation simple :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}, \quad (1.3)$$

avec  $\rho_g$  – densité globale du milieu poreux,  $\rho_m$  – densité du matériau qui forme la structure solide du milieu poreux. Pour déterminer le coefficient  $\rho_g$  il existe différentes techniques, par exemple les mesures des paramètres géométriques et la pesée de l'échantillon, ou encore la substitution volumétrique (cette technique prévoit l'immersion de l'échantillon dans un liquide non mouillant, par exemple le mercure, qui ne pénètre pas dans le milieu poreux), etc.

4. **Méthode d'expansion du gaz** : consiste à mesurer directement le volume du gaz qui se trouve dans l'échantillon et qui est égal au volume des pores.
5. **Méthode d'imbibition** : Cette méthode permet de déterminer la porosité effective du milieu poreux. Elle se base sur la capacité du matériau poreux à s'imbiber d'un fluide.

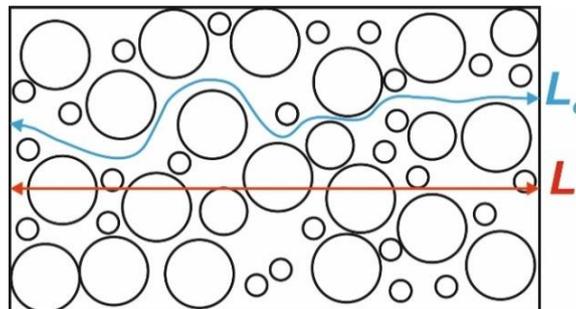
6. **Méthode basée sur la tomographie par absorption de rayons X** : permet de faire la reconstruction d'images en section d'un milieu poreux en trois dimensions. Ce type de mesures repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X avec l'échantillon étudié. La valeur de la porosité est obtenue après le traitement d'une séquence d'images numériques.

Le paramètre suivant caractérisant un milieu poreux est la **compacité** (ou taux de remplissage). Contrairement à la porosité, elle représente le rapport entre le volume de solide ( $V_s$ ) et le volume total ( $V_t$ ) d'un échantillon :

$$c = \frac{V_s}{V_t} = 1 - \varepsilon. \quad (1.4)$$

Ce paramètre représente par conséquent le taux d'occupation réel de l'espace à l'intérieur d'un milieu poreux.

Tous les paramètres cités jusqu'ici sont des paramètres de l'échelle macroscopique. On peut trouver par ailleurs, au niveau microscopique, des paramètres qui ont également une influence importante sur l'écoulement dans l'espace poreux : la connectivité et la tortuosité.



**Figure 1-1.** Notion de tortuosité.

La **connectivité** caractérise la topologie du volume des pores, le voisinage des pores et la présence de pores bouchés. La **tortuosité** représente la non-rectilinéarité des trajectoires à l'intérieur du milieu poreux (Figure 1-5). Si on considère un échantillon de longueur  $L$  d'une part, et un canal (trajectoire sinuant entre les pores) de longueur effective  $L_e > L$  qui traverse cet échantillon d'un côté à l'autre, nous pouvons déterminer la tortuosité comme :

$$\tau = \frac{L_e}{L}. \quad (1.5)$$

Autrement dit, la tortuosité caractérise la ligne de courant d'un fluide dans le milieu poreux, par rapport à une ligne droite entre les extrémités d'écoulement dans le milieu poreux.

## Perméabilité

Les premiers travaux fondamentaux concernant l'écoulement laminaire dans les milieux poreux furent réalisés par Darcy en 1856 et décrits dans son ouvrage « Les fontaines publiques de la ville de Dijon » [12]. L'interprétation moderne de l'expérience de Darcy fut donnée par King en 1940 [13]. La Figure 1-6 représente le schéma de cette expérience.

Suivant le schéma de la Figure 1-6, un lit filtrant homogène de hauteur  $h$  est inséré entre deux surfaces planes perforées avec un périmètre constant  $S$ . Un liquide incompressible percole à travers le filtre.

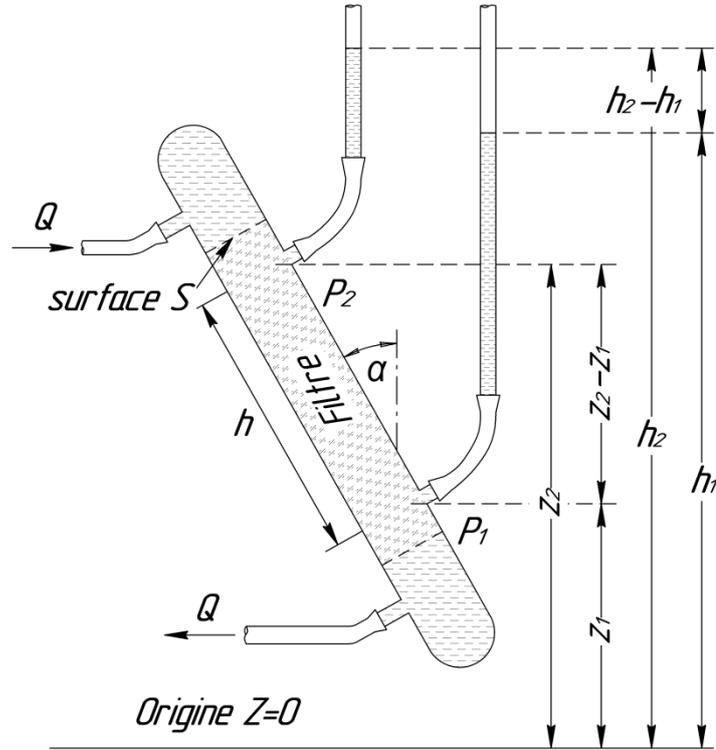


Figure 1-6. Schéma expérimental de Darcy [12].

Deux tubes manométriques sont fixés aux limites inférieure et supérieure du lit filtrant où le liquide s'élève respectivement aux hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  au-dessus d'un repère de référence ( $z=0$ ). En faisant varier les quantités  $h_1$  et  $h_2$ , Darcy déduisit la relation suivante :

$$Q = -\frac{\Phi S(h_2 - h_1)}{h}, \quad (1.6)$$

avec  $Q$  le débit volumique de l'écoulement,  $\Phi$  un coefficient qui dépend des propriétés du liquide et du matériau poreux. Cette expression est connue actuellement sous le nom de **loi de Darcy**.

Connaissant les pressions à l'entrée  $p_2 = \rho g(h_2 - z_2)$  et à la sortie  $p_1 = \rho g(h_1 - z_1)$  du filtre, l'équation (1.6) peut être réécrite :

$$Q = -\Phi S \left( \frac{p_2 - p_1}{\rho g h} + 1 \right), \quad (1.7)$$

$$\text{ou pour la vitesse d'écoulement [1] : } u \equiv \frac{Q}{S} = -\Phi' \left( \frac{p_2 - p_1 + \rho g h}{h} \right) \quad (1.8)$$

Dans sa forme «brute» la loi de Darcy a certaines limites d'application, car le coefficient  $\Phi'$  dépend à la fois de la propriété du liquide et de la propriété du matériau. Pour séparer cette double influence, Nutting en 1930 [14] détermina la relation suivante :

$$\Phi' = \frac{\phi}{\mu}, \quad (1.9)$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique du liquide et  $\phi$  la perméabilité spécifique du milieu poreux (ci-après on l'appelle la perméabilité).

Selon un concept plus moderne la loi de Darcy peut être réduite à la forme suivante :

$$u = -\frac{\phi}{\mu} \frac{dP}{dx}, \quad (1.10)$$

où  $\frac{dP}{dx}$  est le gradient de pression. D'après Nield et Bejan [11], le coefficient  $\phi$  est indépendant de la nature du fluide, mais dépend de la géométrie du milieu poreux.

Dans le domaine tridimensionnel, l'écoulement de Darcy pour le milieu poreux isotrope peut être généralisé à la relation ci-dessous :

$$u = -\frac{\phi}{\mu} \nabla P. \quad (1.11)$$

Conformément à tout ce qui précède, la **perméabilité** est un paramètre qui caractérise la capacité du milieu poreux à conduire à travers lui un liquide sous un gradient de pression donné. La dimension de la perméabilité est le carré d'une longueur. Mais, dans différentes branches des sciences appliquées, on retrouve des dimensions variées. Par exemple, si on considère l'industrie pétrolière, l'unité de mesure est le «darcy» ( $1 \text{ darcy} = 0,987 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ).

A titre d'exemple, la perméabilité pour différents matériaux est donnée dans le Tableau 1-2.

**Tableau 1-2.** Perméabilité des matériaux poreux, d'après Nield et Bejan [11].

Matériaux	Perméabilité $\phi$ (cm <sup>2</sup> )
Poudre d'ardoise noir	$4,9 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$
Brique	$4,8 \cdot 10^{-11} - 2,2 \cdot 10^{-9}$
Béton (bitumineux)	$1 \cdot 10^{-9} - 2,3 \cdot 10^{-7}$
Poudre de cuivre (compacté à chaud)	$3,3 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5}$
Cuir	$9,5 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$
Calcaire (dolomite)	$2 \cdot 10^{-11} - 4,5 \cdot 10^{-10}$
Sable	$2 \cdot 10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-6}$
Grès	$5 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-8}$
Poudre de silice	$1,3 \cdot 10^{-10} - 5,1 \cdot 10^{-10}$
Sol	$2,9 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-7}$

### I.3. Mesures de la perméabilité

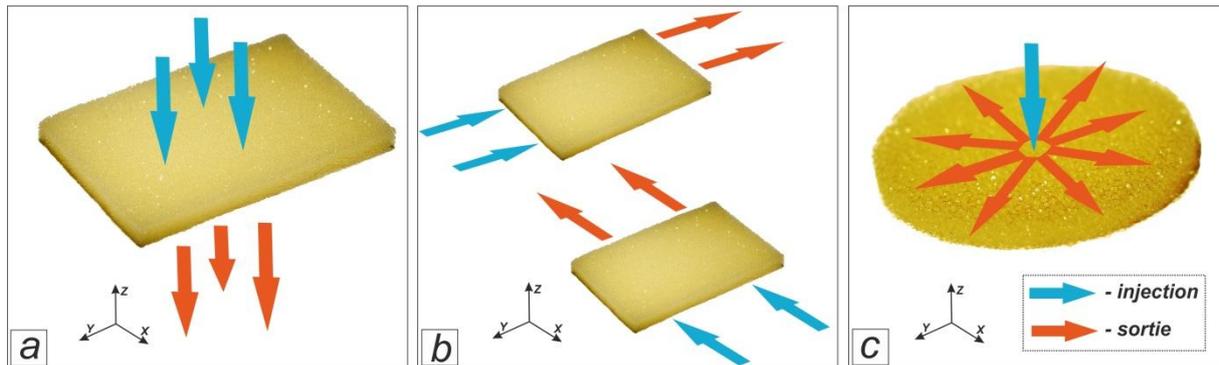
Il existe différentes techniques et méthodes de mesure de la perméabilité d'un milieu poreux. Le choix dépend d'une large palette de facteurs : la géométrie, la distribution des pores, la nature et les propriétés des matériaux, les propriétés et l'état du liquide, ainsi que son interaction avec le milieu poreux.

En général, le principe de mesure de la perméabilité consiste à mesurer le débit d'un liquide de viscosité donnée à travers un échantillon pour un gradient de pression qui provoque un écoulement. Il est aussi possible de faire les mesures autrement : évaluer le gradient de pression pour un débit déterminé. Indépendamment de la technique choisie, la phase finale de

la procédure comprend le calcul de la perméabilité suivant la loi d'écoulement à l'intérieur du milieu poreux.

Pour un échantillon de matériau poreux dont l'épaisseur est beaucoup plus faible par rapport aux deux autres dimensions, l'écoulement du liquide peut être décomposé en deux formes :

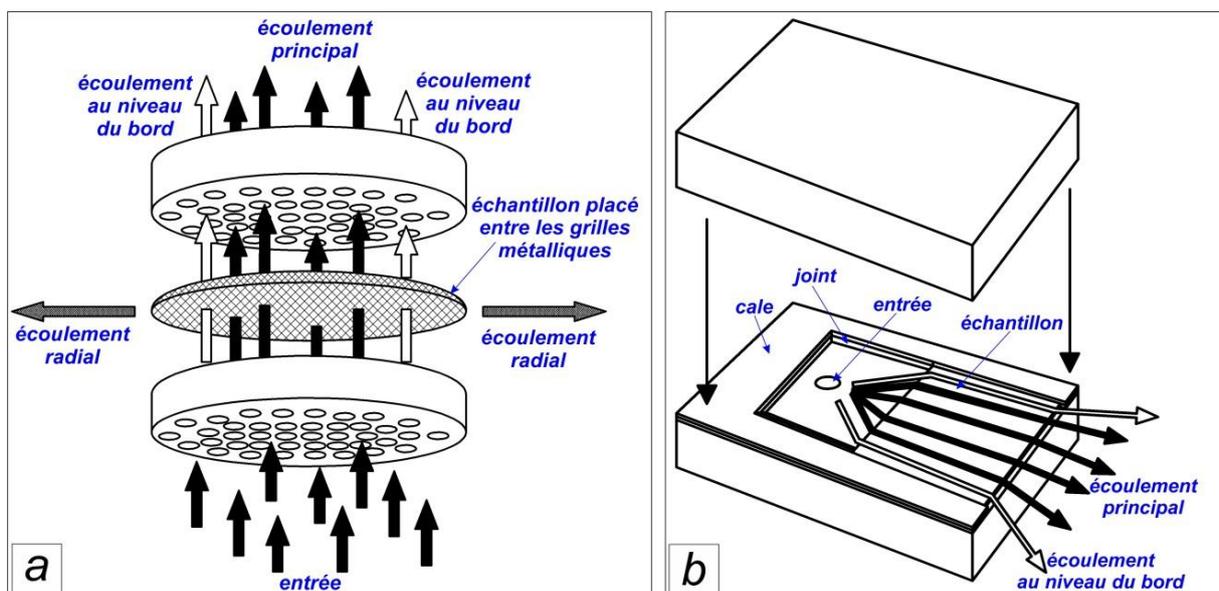
- ❖ L'écoulement transversal pour lequel le liquide circule à travers le matériau poreux dans la direction de l'axe normal (Figure 1-7a).
- ❖ L'écoulement plan où le liquide circule à travers le matériau dans le plan déterminé par son épaisseur.



**Figure 1-7.** L'écoulement dans un matériau poreux : a) l'écoulement transversal, b) l'écoulement plan longitudinal, c) l'écoulement plan radial.

Dans le contexte de l'écoulement plan on peut distinguer deux types d'écoulement : longitudinal et radial. Pour le premier cas, l'écoulement s'effectue suivant l'un des deux axes situés dans la surface plane (Figure 1-7b). En cas de l'écoulement radial, un liquide est injecté au centre d'un échantillon et se propage ensuite dans des directions radiales (Figure 1-7c).

Dans son travail Lundström [15] donna la description détaillée des dispositifs expérimentaux qui lui avaient permis de mesurer la perméabilité d'un milieu poreux pour différentes directions d'écoulement. Les mesures furent réalisées avec des feutres et des fibres de renforcement en combinaison avec de l'huile de paraffine et de l'eau.

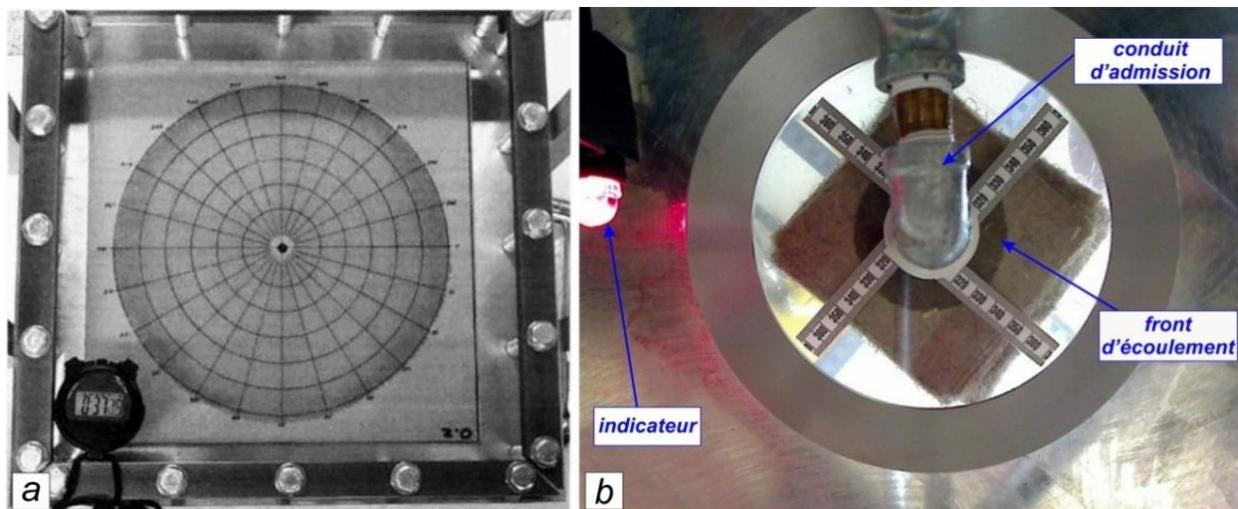


**Figure 1-8.** Dispositifs expérimentaux de Lundström : a) cellule de mesure, b) perméamètre longitudinal.

Le premier dispositif est une cellule d'essais (Figure 1-8a) où le matériau poreux est placé entre deux grilles métalliques et ensuite entre deux cuves de circulation. Cet assemblage est inséré dans un système de serrage étanche et alimenté par une centrale hydraulique. L'installation est instrumentée avec des thermocouples et des capteurs de pression, le débit à travers la cellule est obtenu en pesant en continu le liquide sortant de la cellule à l'aide de balances. Ce dispositif permet de mesurer séparément le débit principal, le débit au niveau du bord ainsi que le débit radial.

Le deuxième dispositif de mesures est un perméamètre longitudinal (Figure 1-8b). Il consiste en un support rigide et une plaque supérieure en aluminium. Une cavité pour introduire l'échantillon et un canal d'alimentation sont usinés dans le support. Une cale calibrée est insérée entre le support et la plaque pour contrôler le jeu et l'épaisseur du matériau poreux. Il faut noter que dans ce type de dispositif, l'effet du bord a plus d'influence que dans le cas précédent. Pour cette raison, un séparateur d'écoulement amovible est installé à la sortie du perméamètre. Cela permet de diviser l'écoulement principal et l'écoulement près des parois et les mesurer indépendamment.

Lundström conçut ensuite un dispositif supplémentaire pour déterminer les principales directions d'écoulement et observer le front d'écoulement plan radial dans le matériau poreux (Figure 1-9 a). Il se compose d'une base en aluminium, une plaque en Plexiglas, une cale intermédiaire et des éléments de fixation. L'échantillon de matériau poreux est placé sur la base et comprimé par la plaque supérieure jusqu'à l'épaisseur de la cale calibrée. Un trou d'alimentation est percé au centre de la base pour conduire le liquide vers le matériau et assurer l'écoulement radial correct à travers le matériau poreux.

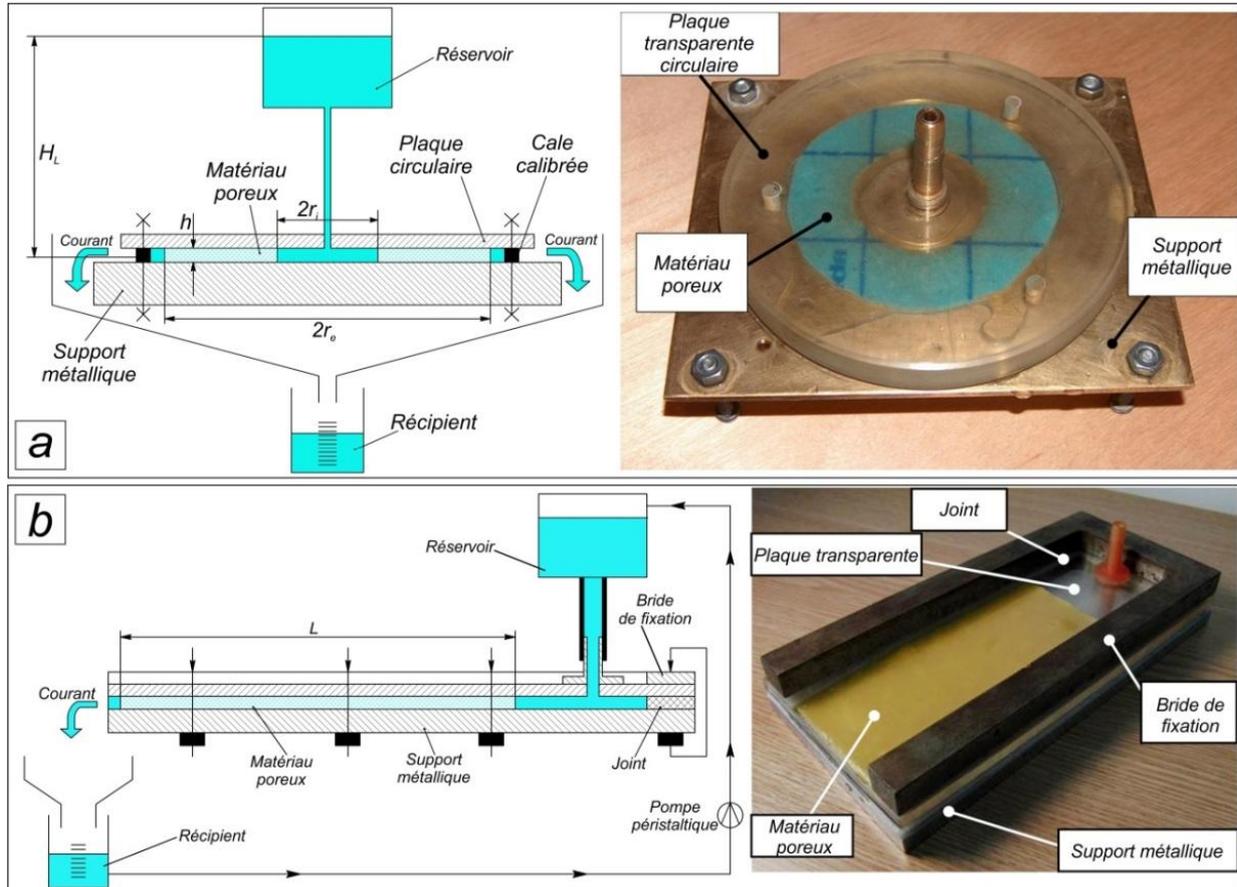


**Figure 1-9.** Dispositifs expérimentaux : a) dispositif d'observation de Lundström, b) dispositif de mesure et d'observation de Mekic.

Un dispositif similaire, développé par Mekic et Bakke [16], est représenté Figure 1-9b. L'appareil est conçu de telle sorte qu'il permet de mesurer la perméabilité soit en direction plane radiale soit en direction transversale. Comme dans les cas précédents, le taux de compression d'un matériau poreux ainsi qu'un jeu entre deux plaques transparentes rigides sont contrôlés par une entretoise. L'injection du liquide s'effectue par un conduit d'admission

avec un ajustement différent pour chaque mode de mesure. L'instrumentation du dispositif expérimental comprend deux capteurs de pression et une caméra haute résolution.

En fonction du mode de mesure, la caméra peut être placée soit au-dessus de la plaque supérieure pour l'écoulement plan, soit au-dessous de la plaque inférieure pour l'écoulement transversal. L'image reçue à partir de la caméra permet d'analyser l'écoulement à travers le matériau poreux, notamment d'en déterminer la vitesse.

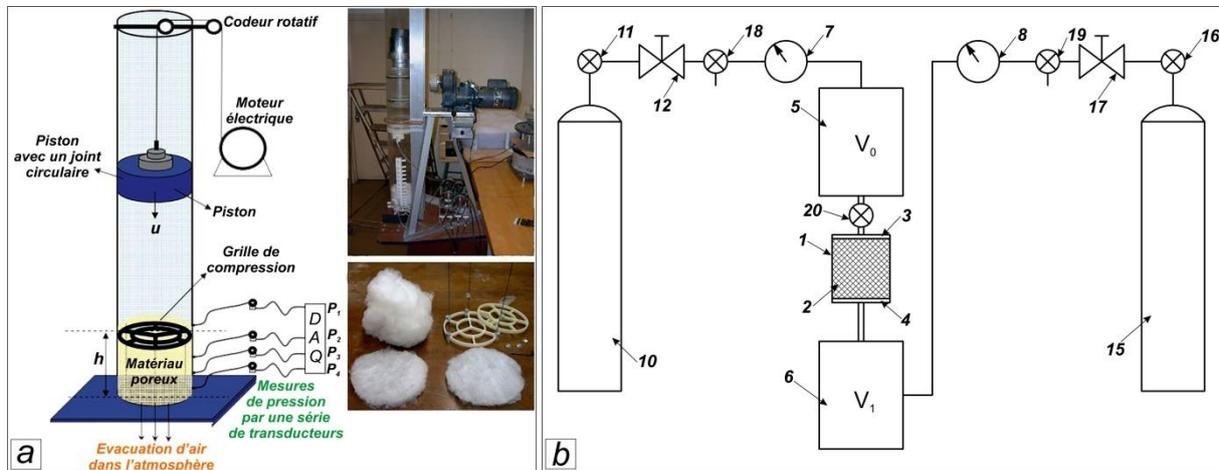


**Figure 1-10.** Dispositifs expérimentaux de l'UPB : a) perméamètre radial [17], b) perméamètre longitudinal (unidirectionnel) [18].

Dans le cadre de l'étude de la lubrification XPHD à l'Université Polytechnique de Bucarest (UPB), deux dispositifs d'essais furent spécialement conçus pour déterminer la variation de la perméabilité du matériau poreux en fonction de sa porosité. Les dispositifs permettent de réaliser des mesures de perméabilité pour un écoulement plan radial (Figure 1-10a) et pour un écoulement plan longitudinal (Figure 1-10b). Le perméamètre radial est destiné à l'étude des matériaux poreux isotropes tandis que le perméamètre longitudinal à celle des matériaux anisotropes (ou pour les matériaux isotropes pour lesquels la direction d'écoulement principale est déterminée antérieurement). La variation de la porosité du matériau est effectuée grâce à un assortiment de cales calibrées qui assurent le jeu nécessaire entre le support et la plaque supérieure. Les dispositifs sont alimentés avec de l'eau sous une pression hydrostatique d'environ  $P_{\max}=0,2$  bars.

Les deux perméamètres donnent la possibilité de mesurer en continu le débit total du liquide à travers le milieu poreux. Cependant, pour le perméamètre radial, l'influence de

l'effet de bord sur le débit total est négligeable tandis que pour le perméamètre longitudinal cette influence joue un rôle très important. De plus, le perméamètre longitudinal de l'UPB n'était pas équipé d'un écarteur réglable pour séparer l'écoulement principal et l'écoulement au niveau des bords (comme c'était le cas pour celui de Lundström).



**Figure 1-11.** Dispositifs expérimentaux alimentés avec du gaz a) dispositif de Akaydin, b) schéma de l'installation expérimentale de Lasseux et Jannot [1-cellule étanche, 2-échantillon, 3-face amont, 4-face aval, 5, 6-réservoirs, 7, 8-manomètres, 10-bouteille du gaz, 11, 16, 18, 19, 20-vannes, 12, 17-détendeurs, 15-bouteille de récupération].

On peut noter que tous les dispositifs cités précédemment utilisent comme fluide de circulation différents liquides (eau, huiles, etc.). Il existe, d'autre part, une large gamme d'installations expérimentales alimentées par un gaz que nous décrivons brièvement ci-dessous.

Par exemple le dispositif développé par Akaydin et al. [19] est constitué d'un tube vertical en plexiglas avec un piston mobile à l'intérieur (Figure 1-11a). Le matériau poreux se fixe avec un support spécial dans la partie inférieure du tube. Le mouvement descendant du piston provoque l'échappement de l'air à travers le matériau poreux. Les mesures de la variation de pression s'effectuent grâce aux capteurs de pression qui se situent tout au long de l'échantillon. En complément, un codeur rotatif est utilisé pour mesurer la vitesse du piston. La particularité de cette installation est qu'elle permet de déterminer directement le gradient de pression contrairement aux dispositifs qui mesurent le débit à travers un échantillon étudié.

Lasseux et Jannot [20] développèrent quant à eux une installation expérimentale pour étudier les matériaux présentant une grande résistance à l'écoulement comme des roches, des matériaux composites, etc. L'installation comporte une cellule de Hessler avec un échantillon cylindrique à l'intérieur (Figure 1-11b). Cette cellule permet d'enfermer l'échantillon de manière étanche afin d'injecter le gaz (azote ou hélium). Les faces amont et aval de l'échantillon communiquent avec deux réservoirs différents, qui sont instrumentées avec des manomètres. Les réservoirs sont reliés à une bouteille d'alimentation et à une bouteille de récupération respectivement. Une variation de pression dans le premier réservoir provoque le mouvement du gaz à travers l'échantillon et par suite conduit à la variation de pression dans le deuxième réservoir. Cette variation de pression est mesurée et à la suite analysée numériquement à l'aide d'une équation différentielle.

Cette installation permet d'estimer lors de la même expérience à la fois la perméabilité et la porosité du matériau ainsi que le coefficient de Klinkenberg<sup>1</sup> (quand il s'agit d'un milieu peu perméable et d'un écoulement de gaz à bas niveau de pression) ou le coefficient de Forchheimer (en cas de niveaux de débits plus élevés donnant lieu à des effets inertiels).

## I.4. Modèles de variation de la perméabilité en fonction de la porosité

Des nombreuses tentatives ont été faites par des scientifiques pour exprimer la perméabilité en fonction des caractéristiques du milieu poreux. D'un point de vue de l'application pratique, la relation entre la perméabilité et la porosité présenterait le plus grand l'intérêt. Cependant, l'analyse simple montre que la corrélation universelle n'existe pas car, parfois, deux milieux poreux de même porosité peuvent avoir des perméabilités complètement différentes. Autrement dit, la fonction de corrélation ne peut pas être unique et inclut toujours des paramètres supplémentaires. Les valeurs des paramètres se déterminent de façon empirique et dépendent fortement de la nature du milieu.

Il est possible de distinguer quatre catégories de modèles qui permettent d'obtenir le rapport entre la perméabilité et la porosité [1] :

- ❖ Modèles de canaux capillaires (modèles de capillaires linéaires, modèles de capillaires parallèles, modèles de type série, modèle de canaux ramifiés).
- ❖ Modèles de rayons hydrauliques.
- ❖ Modèles de traînée.
- ❖ Modèles statistiques.

Les **modèles de canaux capillaires** se basent sur une analyse des propriétés d'écoulement microscopiques. Ces modèles considèrent que l'écoulement se produit dans des canaux à l'intérieur du milieu poreux.

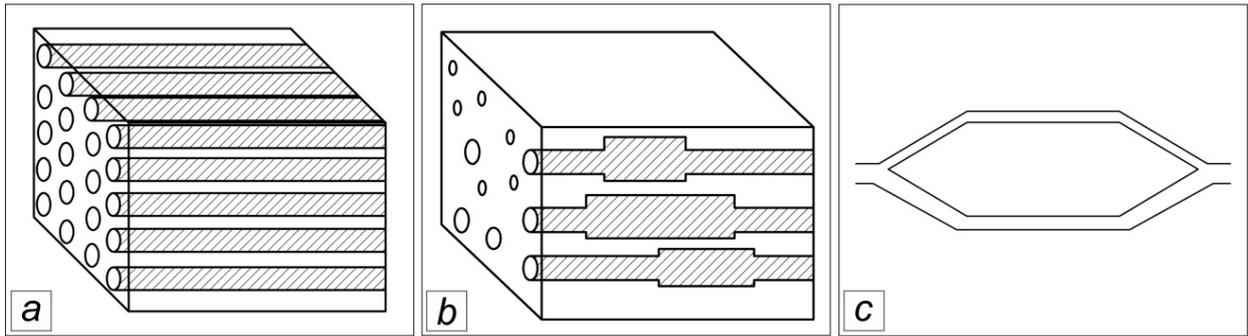
L'un des plus simples, le **modèle de type linéaire**, fut décrit par Scheidegger en 1953 [21] et présente un faisceau de capillaires parallèles de diamètre constant  $d_c$  (Figure 1-12a). Dans ce cas, le débit à travers l'échantillon peut être calculé de deux façons : suivant la loi de Hagen-Poiseuille et suivant la loi de Darcy.

A partir de ces deux équations et en calculant le volume total des pores, la perméabilité peut être déterminée comme suit :

$$\phi = \frac{\varepsilon d_c}{32} . \quad (1.12)$$

---

<sup>1</sup> Le coefficient de Klinkenberg est un coefficient-correcteur de la perméabilité du milieu poreux qui prend en compte le glissement des particules de gaz lorsque le libre parcours moyen dans le gaz est du même ordre de grandeur que la taille caractéristique des pores. Cet effet fut découvert par Klinkenberg L. J.



**Figure 1-12.** Modèles des canaux capillaires d'après [1] : a) modèle des canaux linéaires, b) modèle de type série, c) modèle des canaux ramifiés.

Cependant, pour des matériaux poreux réels, cette équation n'est pas suffisamment précise. Pour le cas général, Scheidegger introduisit des modifications et obtint la relation suivante :

$$\phi = \frac{\varepsilon^3}{\tau^2 A^2}, \quad (1.13)$$

où  $\tau$  est la tortuosité et  $A$  la surface interne spécifique (rapport entre la surface des pores et le volume total). Actuellement, les équations de ce type (1.13) sont appelées les équations de Kozeny [1].

Le **modèle de capillaires parallèles** envisage un milieu poreux perméable dans une seule direction. Les capillaires déterminant la direction de l'écoulement sont parallèles à cet écoulement, mais leur diamètre varie selon les diamètres des pores. L'écoulement s'effectue d'une face vers une autre face du milieu poreux. La distribution des pores est considérée identique au milieu poreux réel. Le modèle fut défini par Purcell en 1949 [22]. Mais une analyse ultérieure montra que ce type de modèle ne présentait pas d'avantage important par rapport au modèle des capillaires linéaires.

D'après le **modèle de type série**, le milieu poreux est représenté par un corps avec des capillaires sinueux de diamètres variables qui sont empilés en série les uns après les autres (Figure 1-12b). Ce modèle permet d'éviter les défauts des modèles cités précédemment, en particulier l'hypothèse que tous les pores traversent l'échantillon d'une extrémité directement vers l'autre extrémité. Le modèle détermine la perméabilité sous la forme suivante [21] :

$$\phi = \frac{1}{96} \frac{\varepsilon \overline{d_p^2}}{\tau^2}. \quad (1.14)$$

Cependant, dans cette expression, le diamètre des pores moyen  $\overline{d_p}$  n'est pas déterminé rigoureusement. Par conséquent, le modèle doit être modifié en faisant varier le diamètre de chaque capillaire le long de sa longueur suivant la fonction de distribution des pores. Dans ces conditions il est évident que cette modification nécessite des analyses et des mesures supplémentaires pour déterminer la distribution des pores dans le matériau.

Dans le contexte des modèles des canaux capillaires, une autre approche est représentée par le **modèle des canaux ramifiés**. Ce modèle prévoit l'effet de bifurcation du fluide à l'intérieur du milieu poreux. C'est-à-dire que l'écoulement du fluide se produit dans les canaux ramifiés (Figure 1-12c) ou dans le réseau formé par ces canaux. Les modèles les plus sophistiqués (Schopper, 1966 [23]) peuvent inclure des données introduites par une

fonction qui décrit la résistance hydraulique en fonction de la résistance hydraulique individuelle des capillaires.

Toutefois, la compréhension satisfaisante des processus hydrodynamiques à l'intérieur du milieu poreux nécessite d'avoir des modèles plus complexes. Les **modèles des rayons hydrauliques** présentent une alternative aux modèles de canaux capillaires. Cependant, ils ont aussi des limites aux hypothèses utilisées.

Selon ces modèles, le milieu poreux est équivalent à des séries de canaux ayant des formes plus complexes que pour les modèles capillaires. La perméabilité en unité absolue est proportionnelle à la dimension de la surface ou au carré de la longueur. Cette longueur peut être considérée comme une caractéristique de la perméabilité et est appelée le rayon hydraulique du milieu poreux.

Ces modèles se basent sur un certain nombre d'hypothèses [1] parmi lesquelles on peut citer les suivantes :

- les pores sont distribués de manière aléatoire ;
- tous les pores sont ouverts et participent à l'écoulement ;
- la variation entre les tailles des pores est assez faible ;
- le milieu poreux est représenté par un matériau avec une porosité moyenne ;
- l'écoulement s'effectue à travers des paquets de canaux ;
- l'effet de diffusion (glissement) est négligé.

L'approche la plus simple pour résoudre ce problème consiste en la construction de modèles géométriques de milieux poreux [1].

C'est ainsi qu'en 1927, Kozeny [24] présenta un modèle qui donnait l'explication la plus courante de la perméabilité en fonction des propriétés du milieu poreux. D'après ce modèle, le milieu poreux est représenté par un ensemble de canaux de sections transversales différentes avec une certaine longueur. La résolution de l'équation de l'écoulement s'effectue simultanément pour tous les canaux qui traversent la section transversale normale à l'écoulement dans le milieu poreux. Dans le cas général, la porosité du milieu poreux est exprimée par une surface spécifique ( $A_s$ ) :

$$\phi = \frac{k_K \varepsilon^3}{A_s^2} . \quad (1.15)$$

Cette expression est appelée **l'équation de Kozeny**, avec  $k_K$  le coefficient de Kozeny, qui varie théoriquement entre 0,56 et 0,66. L'équation (1.15) peut être également écrite en introduisant la tortuosité :

$$\phi = \frac{k_K \varepsilon^3}{\tau A_s^2} . \quad (1.16)$$

Cependant la théorie de Kozeny comme toutes les autres théories a ses limites d'application et des incertitudes. On peut mentionner les principaux points faibles de cette théorie : la composante tangentielle de la vitesse dans les canaux est négligée ; elle ne prend pas en compte une anisotropie du matériau, ainsi que ne peut pas être appliquée pour certains milieux poreux non-isotropes (par exemple l'argile schisteuse) [1].

Notons qu'il existe un grand nombre de modifications de la théorie de Kozeny. La modification la plus courante fut proposée par Carman en 1937 [25] :

$$\phi = \frac{\varepsilon^3}{5A_S^2(1-\varepsilon)^2}. \quad (1.17)$$

Par la suite, cette expression fut modifiée par Ghaddar [26] pour l'écoulement à travers un milieu poreux représenté par des fibres empilées de diamètre constant  $d_f$  :

$$\phi_{KC} = \frac{d_f^2 \varepsilon^3}{16k_{KC}(1-\varepsilon)^2}. \quad (1.18)$$

Dans l'équation (1.18) la constante de Kozeny-Carman  $k_{KC}$  peut varier selon la propriété du milieu poreux et sa porosité.

Les **modèles de traînée** donnent une approche complètement différente pour la compréhension physique de la perméabilité. Cette théorie fut présentée pour la première fois par Emersleben en 1925 [27]. Les parois des pores sont considérées comme des obstacles à l'écoulement du fluide. Le ralentissement du fluide par une paroi est estimé à partir de l'équation de Navier-Stokes, tandis que l'influence totale des parois représente la résistance à l'écoulement du milieu poreux. Pour calculer la perméabilité, Emersleben établit l'expression suivante [1] :

$$\phi = \frac{3}{16} \frac{\varepsilon d_f}{(1-\varepsilon)} \frac{2 - \ln(d_f u \rho / \mu \varepsilon)}{4 - \ln(d_f u \rho / \mu \varepsilon)}, \quad (1.19)$$

où  $u$  est la vitesse d'écoulement,  $\rho$  la masse volumique du liquide.

L'équation (1.19) montre un aspect important de la théorie de traînée : la perméabilité n'est pas une valeur constante, variant à l'inverse de la vitesse d'écoulement. Cette variation très faible de la perméabilité est assez typique pour un grand nombre d'exemples avec un écoulement visqueux [1].

Toutes les catégories de modèles qui furent décrites ci-dessus considéraient le milieu poreux suffisamment ordonné pour trouver les solutions exactes de l'équation. En réalité, les matériaux poreux présentent souvent des structures complètement chaotiques, pour lesquelles il est impossible de trouver une solution analytique de l'équation d'écoulement.

Les **modèles statistiques** étudient le milieu poreux en créant des modèles désordonnés et en utilisant les méthodes de la mécanique statistique.

En 1940, Hubbert [13] fut le premier à appliquer la statistique à la théorie de l'écoulement à travers un milieu poreux. Ensuite, Childs et Collins-George [28] proposèrent un modèle qui se basait sur la distribution des pores suivant ses tailles. Ce modèle analyse la possibilité du raccordement des pores de tailles différentes et leur influence sur la perméabilité.

Au milieu des années cinquante, Scheidegger [29] appliqua la statistique des phénomènes désordonnés, semblable à la théorie d'Einstein du mouvement brownien, à l'écoulement du fluide dans un matériau poreux. Selon Scheidegger, le mouvement de chaque point du liquide se traite comme un processus aléatoire dans des limites qui sont celles de l'ensemble macroscopique du milieu poreux. Cette approche modifie l'équation de Darcy en y introduisant une nouvelle grandeur macroscopique, la dispersion ( $\mathbb{D}$ ). Dans ce cas, l'équation différentielle du mouvement du liquide s'exprime par une fonction de distribution aléatoire pour chaque point du courant :

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} = \Delta(\varepsilon \rho \mathbb{D}) + \operatorname{div} \left( \rho \frac{\phi}{\mu} \operatorname{grad} p \right). \quad (1.20)$$

## I.5. Modèles d'écoulement dans un milieu poreux

Pour étudier les processus d'écoulement dans un milieu poreux, il existe différents modèles qui utilisent des lois basiques de transfert de masse, d'énergie et de quantité de mouvement. On utilise généralement la loi de Darcy citée précédemment. On réécrit cette loi sous la forme suivante :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\phi} u. \quad (1.21)$$

Cette loi fut validée par des résultats d'un grand nombre d'expériences [1], [30]. Malgré cela, le modèle de Darcy présente toujours certaines limites d'applications. Il est par exemple connu que dans le cas d'un écoulement à vitesse élevée, ou dans le cas d'un milieu à porosité importante, on ne peut pas considérer une variation linéaire du gradient de pression avec la vitesse en raison de l'influence significative des effets inertiels. L'existence de ces effets n'est pas prise en compte par la loi de Darcy [31]. Selon Nield et Bejan [11], la rupture de la linéarité n'est pas due à la transition du flux laminaire au turbulent, car le nombre de Reynolds reste relativement petit et l'écoulement dans les pores est encore laminaire. Cependant, cette rupture peut être provoquée par le fait que la traînée de forme, due aux obstacles solides, est probablement comparable à la traînée de surface, due au frottement. Dans les travaux [11], [32], [33] il fut constaté théoriquement que l'application du modèle est limitée à de faibles nombres de Reynolds modifié. Afin de caractériser les domaines de vitesse d'écoulement, on introduit le nombre de Reynolds modifié de la manière suivante :

$$R_e' = \frac{u \rho d}{\mu}, \quad (1.22)$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide,  $d$  une longueur représentative du milieu poreux (i.e. le diamètre des fibres, le diamètre moyen des particules ou une autre longueur adoptée dans théorie des rayons hydrauliques).

Pour déterminer le nombre de Reynolds modifié, Collins suggéra en 1961 [2] la longueur représentative  $d = \sqrt{\frac{\phi}{\varepsilon}}$ , et Ward [34] proposa quelques années plus tard la relation suivante :

$$R_e' = \frac{u \rho \sqrt{\phi}}{\mu} \quad (1.23)$$

Néanmoins, indépendamment de la relation que l'on utilise pour caractériser l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux, la loi de Darcy est valable en pratique pour un nombre de Reynolds modifié qui ne dépasse pas une valeur comprise entre 1 et 10.

La loi de Darcy subit certaines modifications dans le but d'introduire le terme d'inertie : en 1863 par Dupuit [35] et en 1901 par Forchheimer (selon [11]). L'interprétation

moderne de toutes ces modifications fut faite par Joseph [36] et présente actuellement la forme suivante :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\phi} u - \frac{C_f}{\sqrt{\phi}} \rho |u|u, \quad (1.24)$$

avec  $C_f$  le coefficient de la traînée de forme.

Dans la littérature scientifique on trouve souvent l'équation (1.24) sous le nom de **l'équation de Forchheimer** ou **Darcy-Forchheimer**. Le coefficient  $C_f$  représentant le terme d'inertie, parfois mentionné comme coefficient de Forchheimer, n'est pas une constante universelle mais varie selon la nature du matériau poreux et la vitesse d'écoulement. De plus, en 1974, Beavers [37] montra dans son travail que l'état de surface de la paroi frontière pouvait exercer une influence importante sur le coefficient de Forchheimer.

La transition entre l'écoulement de Darcy et l'écoulement de Darcy-Forchheimer se produit lorsque le nombre de Reynolds modifié est de l'ordre 10. Cette transition est associée à l'apparition des premiers tourbillons dans l'écoulement, par exemple, en cas de rotation du fluide derrière un obstacle ou de l'élargissement brusque de la section d'une conduite [38].

Une autre alternative à l'équation de Darcy est connue actuellement sous le nom de **l'équation de Brinkman** (1948) [39] ou **l'équation de Darcy-Brinkman**. Sans le terme d'inertie, l'équation de Brinkman peut être représentée par la relation ci-dessous :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\phi} u + \mu' \nabla^2 u, \quad (1.25)$$

où  $\mu'$  est viscosité dynamique effective ou seconde viscosité.

Dans l'équation (1.25) on trouve deux termes de viscosité : le premier terme ( $-\frac{\mu}{\phi} u$ ) est le même terme qui apparaît dans la loi de Darcy et le deuxième terme ( $\mu' \nabla^2 u$ ) est le terme qui présente une analogie du terme de Laplace dans l'équation de Navier-Stokes.

Brinkman supposa que la première  $\mu$  et la deuxième  $\mu'$  viscosité sont égales, mais cette affirmation ne correspondait pas à la réalité. Pour cela, certains auteurs essayèrent de déterminer le rapport entre la viscosité dynamique  $\mu$  et la seconde viscosité  $\mu'$ . Cependant, en s'appuyant sur une analyse exhaustive des travaux existants faite par Nield et Bejan [11] on peut constater que toutes les relations établies ont une application restreinte et ne sont valables que pour un seul cas concret. Autrement dit, le rapport universel entre la viscosité dynamique et la deuxième viscosité n'existe pas. Toutefois, Nield et Bejan constatèrent que ce rapport dépend de la nature et de la géométrie du matériau ainsi que de la propriété d'écoulement à l'intérieur du milieu poreux.

Les validations expérimentales de la théorie de Brinkman ne sont pas nombreuses et furent souvent réalisées indirectement. On peut finalement noter qu'il existe une large palette d'opinions concernant des limites d'application de cette théorie. A titre d'exemple, nous citons ci-après quelques points de vue différents sur cette problématique.

En 1981, Levy (selon [11]) montra que l'équation de Brinkman était valide pour un milieu poreux formé par des particules dont la taille est de l'ordre  $(L_{p,p})^3$ , où  $L_{p,p} (\ll 1)$  est une distance entre deux particules voisines. En 1986, Rubinstein proposa dans son travail [40] un modèle du milieu poreux à base de sphères de tailles différentes. Selon les résultats de ce

travail, la théorie de Brinkman peut être acceptable pour un milieu poreux dont la porosité ne dépasse pas la valeur 0,8.

En 1987, une autre solution fut proposée par Durlofsky et Brady [41]. En utilisant la fonction de Green, ils montrèrent que la théorie de Brinkman est valide pour les matériaux poreux avec  $\varepsilon > 0,95$ .

Dans son étude, Auriault [42] en vint à la conclusion que l'écoulement à travers une couche des particules fixes ou un matériau fibreux peut être décrit par l'équation de Brinkman seulement pour des conditions très précises, formulées par Lévi [43]. Néanmoins, pour des matériaux poreux isotropes et homogènes avec des pores connectés, la loi de Brinkman n'a pas de fondement physique et le domaine d'application de l'équation est très restreint.

Une autre tentative intéressante fut faite par certains scientifiques, toujours dans le but d'obtenir une relation universelle d'écoulement à travers un milieu poreux [11]. Leur idée essentielle était de fusionner les lois de Darcy, de Forchheimer et de Brinkman. Ils ont exprimé ceci par l'équation suivante :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{\phi}u + \mu'\nabla^2u - \frac{c_f}{\sqrt{\phi}}\rho|u|u. \quad (1.26)$$

Malgré toute la simplicité de la «fusion», l'équation (1.26) ne fut pas validée expérimentalement, de même que la justification de cette équation n'est pas à notre avis suffisamment claire. De plus, au sein de cette relation, il existe un «conflit» de validité simultané entre la loi de Brinkman et la loi de Forchheimer pour différentes valeurs de porosité (comme nous l'avons cité précédemment, la validité de chaque équation dépend d'un cas concret, de la nature du matériau poreux, ainsi que la propriété du fluide qui passe à travers ce matériau).

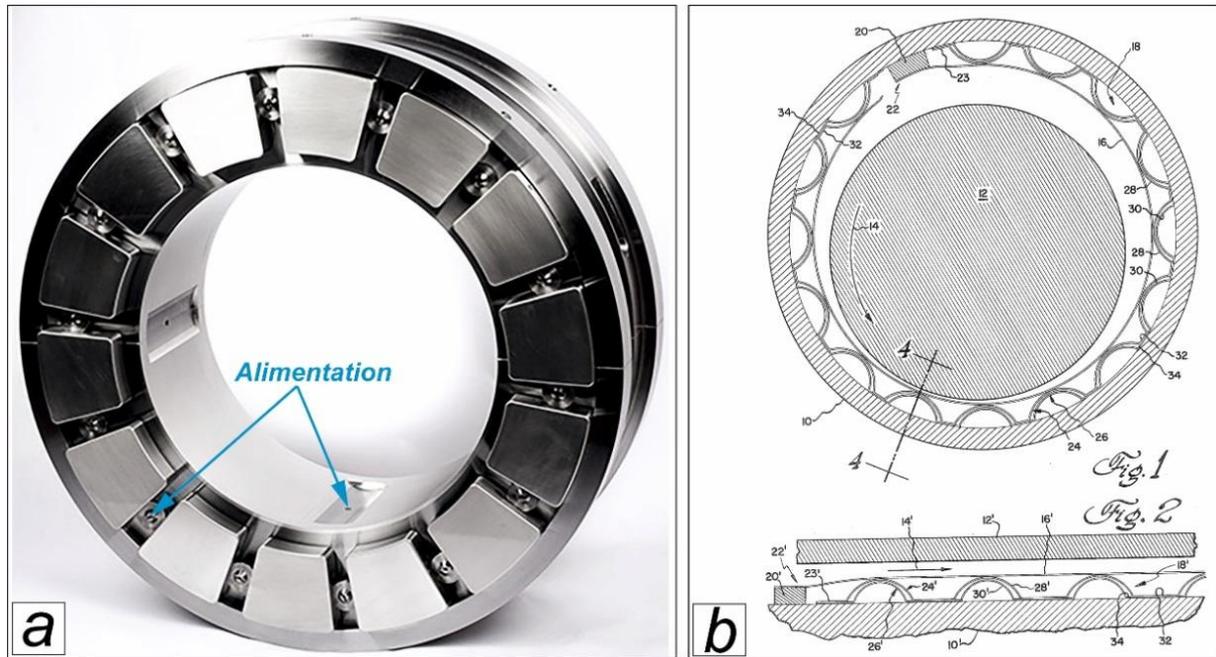
## **I.6. Lubrification Ex-Poro-HydroDynamique (XPHD)**

Il est reconnu que la lubrification joue un rôle primordial dans le fonctionnement correct et fiable de divers systèmes complexes. La réduction du frottement et de l'usure sur les pièces en mouvement est le but principal de la lubrification. Elle permet également de dissiper la chaleur produite dans la zone du contact, ainsi que d'empêcher l'enraiment des mécanismes et de protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de corrosion.

Schématiquement, les solutions de la lubrification «classique» peuvent être représentées comme deux surfaces (fixe et mobile) entre lesquelles se trouve un film lubrifiant. Ce film peut être formé à base de différents types de lubrifiants liquides, solides ou à base de gaz. Le choix d'un lubrifiant ou d'un autre dépend généralement d'un système concret ainsi que des conditions de son exploitation.

L'épaisseur du film doit être suffisante pour éviter le contact sec entre les deux surfaces du mécanisme. La formation et le maintien d'un film de fluide imposent la présence d'une pression dans ce film afin d'équilibrer la charge appliquée entre les deux surfaces. Dans le cas de la lubrification hydrodynamique, cette pression est créée par le déplacement relatif

des surfaces [44]. Néanmoins, dans les mécanismes tournants, en fonction des phases de fonctionnement (notamment au démarrage et à l'arrêt), l'épaisseur du film peut être insuffisante pour supporter la charge statique et assurer un régime de lubrification convenable. C'est pourquoi dans certaines applications les organes du guidage doivent être conçus de façon à permettre aux systèmes de fonctionner en toute sécurité quelles que soit les conditions de fonctionnement.



**Figure 1-13.** Éléments de guidage : a) palier-butée hydrodynamique [45], b) palier à feuilles [10 – fourreau, 12 – arbre en rotation, 16 – feuille supérieure, 20 – soudure, 24,26 – feuilles ondulées] [46].

Pour parvenir à réaliser ces fonctions, les mécanismes comprenant des paliers et butées hydrodynamiques sont équipés d'un système qui apporte du lubrifiant dans la zone du contact sous haute pression via des canaux d'alimentation (Figure 1–13a). Une autre solution est celle des butées et paliers aérodynamiques. La Figure 1–13b montre un exemple d'un palier à feuilles. Ce type du guidage est équipé d'un ensemble des feuilles ondulées et lisses qui permettent de supporter la charge statique ainsi que des forces de balourd. De plus, pour diminuer l'influence négative du frottement sec à l'arrêt et au démarrage, la feuille lisse supérieure est souvent revêtue d'un matériau antifrottement (Téflon, Korolon, MoS<sub>2</sub>, NASA PC304) [47].

La lubrification eX-Poro-HydroDynamique (ou lubrification XPHD) présente quant à elle une approche scientifique différente du traitement des problèmes tribologiques. En parlant d'un langage théâtral, les acteurs principaux dans les «applications classiques» sont présentés par les surfaces de contact et le film lubrifiant ; ainsi donc, l'action se déroule autour de ces protagonistes et leurs interactions. La lubrification XPHD met en scène un acteur supplémentaire, qui de plus, est l'acteur principal dans ce type de lubrification, dont le nom est «le milieu poreux».

La lubrification XPHD se base sur un mécanisme d'inspiration biomimétique. Il s'agit principalement d'un écoulement dans un milieu poreux, dont la phase solide représentée par des fibres, induit des forces élastiques de compression considérées comme négligeables par

rapport aux forces hydrodynamiques générées à l'intérieur du milieu. La lubrification XPHD peut se manifester dans le cadre d'un mouvement tangentiel. Dans ce cas, le champ de pression généré est aussi connu sous le nom de «lubrification par dislocation».

Schématiquement, le principe est présenté sur la Figure 1-14. Le déplacement du dislocateur provoque l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux. Il faut également préciser que ce type de lubrification est fortement dépendant de la variation de porosité et donc de perméabilité du milieu poreux.

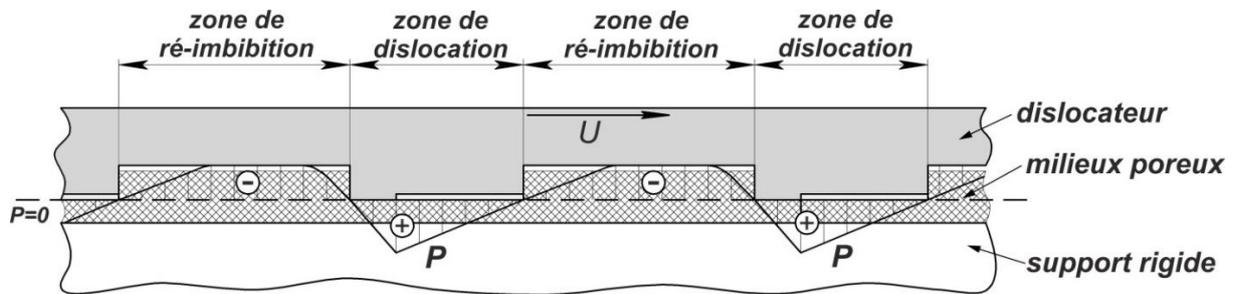


Figure 1-14. Principe de la lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD).

Le terme de «**lubrification eX-Poro-HydroDynamique**» fut introduit pour la première fois en 2001 par le Professeur Mircea D. Pascovici de l'Université Polytechnique de Bucarest (UPB) au deuxième Congrès Mondial de Tribologie [48]. L'étymologie de ce terme est la suivante : **ex** – terme associé au phénomène d'extraction ; **poro** – fait référence au matériau poreux ; **hydrodynamique** – terme qui se rapporte à la lubrification hydrodynamique [49].

Néanmoins, les premières recherches bibliographiques nous mènent vers la conclusion que les travaux de recherches «purs» dans le domaine de la lubrification XPHD ne sont pas très nombreux. D'un côté, cela peut paraître la vérité, mais en élargissant notre «zone de recherches», on découvre que les phénomènes intervenant dans la lubrification XPHD peuvent être trouvés dans différents domaines et dans diverses applications techniques (ci-après, on cite ces exemples).

En analysant les travaux de recherche des trois dernières décennies, il est possible de distinguer quelques équipes de recherches qui apportèrent une contribution importante à ce domaine de la science.

Le Professeur Pascovici et son équipe, à juste titre, peuvent être considérés comme quelques-uns des pionniers de la lubrification XPHD. C'est ainsi qu'en 1994, Pascovici breveta un dispositif de pompage d'un liquide par effet de dislocation [50]. Cette invention présente une pompe visqueuse qui consiste en un dislocateur en configuration de Rayleigh et en une surface lisse avec une couche élastique poreuse imbibée d'un liquide (Figure 1-15). Le dislocateur effectue le déplacement du liquide absorbé par le matériau poreux et propulse ce liquide dans la conduite à travers un trou situé dans la zone de la pression maximale. Les résultats expérimentaux montrèrent une augmentation importante de la vitesse et donc du débit par rapport à la configuration sans couche poreuse.

Plus tard, au sein du laboratoire de tribologie de l'UPB, le Professeur Pascovici conçut un banc d'essais pour réaliser des études expérimentales du mécanisme de la lubrification XPHD [48]. Ce banc d'essais (Figure 1-16a) était destiné essentiellement à étudier l'effet

XPHD dans le cadre du mouvement tangential (en particulier l'application pour les paliers de butée). Dans ce cas, la butée est constituée d'un dislocateur fixe en configuration de Rayleigh (Figure 1-16b) et d'un grain mobile couvert d'une couche du matériau poreux (Figure 1-16c). Les essais furent réalisés pour deux liquides (l'eau et l'huile) en combinaison avec différents matériaux poreux (feutre et coton+cellulose). Les premiers essais prouvèrent que la pression générée grâce à l'effet XPHD était plus importante par rapport à celle obtenue dans le cas d'un régime hydrodynamique (i.e. sans le matériau poreux).

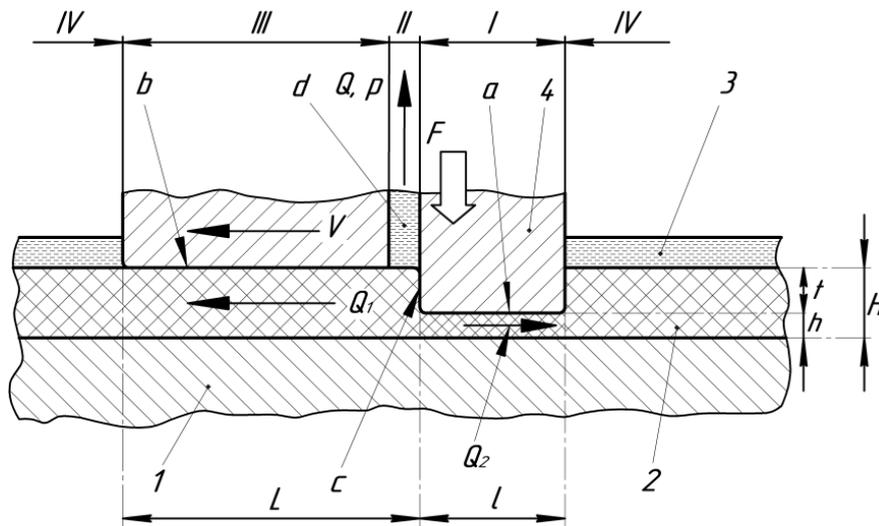


Figure 1-15. Brevet de Pascovici : dispositif de pompage d'un liquide par effet de dislocation [50].

Les résultats expérimentaux obtenus montrent la faisabilité du mécanisme de la lubrification XPHD et notamment ses performances pour des conditions de faible vitesse, lorsque d'autres mécanismes hydrodynamiques sont inefficaces.

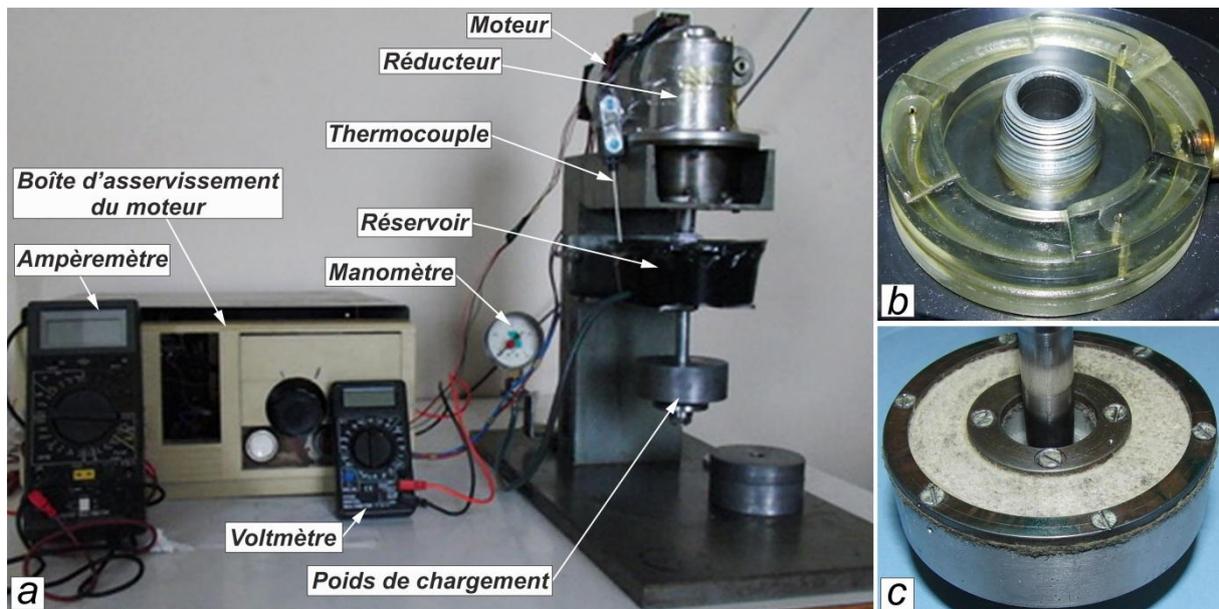


Figure 1-16. Banc d'essai à l'UPB : a) ensemble du banc d'essai ; b) dislocateur fixe ; c) grain mobile équipé d'un feutre.

Parallèlement à ces recherches expérimentales, Pascovici proposa un modèle analytique simplifié de la lubrification XPHD en introduisant les hypothèses suivantes [48] :

- ❖ Le fluide est newtonien et non compressible ; l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux est laminaire et isotherme ;
- ❖ La pression du fluide est constante suivant l'épaisseur du matériau poreux ;
- ❖ L'écoulement dans le milieu poreux est conforme à la loi de Darcy ;
- ❖ Les forces élastiques à l'intérieur du matériau poreux sont négligeables par rapport aux forces hydrodynamiques ;
- ❖ La perméabilité est corrélée avec la porosité par la relation de Kozeny-Carman ;
- ❖ Le volume de la structure du milieu poreux ne varie pas en fonction du taux de compression ;
- ❖ L'écoulement du fluide se produit principalement dans le plan longitudinal ; l'écoulement dans la direction transversale du matériau poreux est négligeable.

Ce modèle démontra que la capacité de charge dans le cas de lubrification XPHD était d'au moins deux ordres de grandeurs supérieurs à la capacité de charge pour le cas classique avec les mêmes dimensions et la même vitesse. D'après les auteurs, les résultats analytiques et les résultats expérimentaux montrèrent un accord assez satisfaisant.

En même temps, une large palette de recherches fut réalisée sur le mécanisme de l'écrasement (ou "squeeze") d'un milieu poreux imbibé d'un liquide [51, 52]. Ce mécanisme de l'écrasement joue un rôle primordial dans la lubrification XPHD car il est à l'origine de la génération de l'autoportance dans le matériau poreux soumis à la compression.

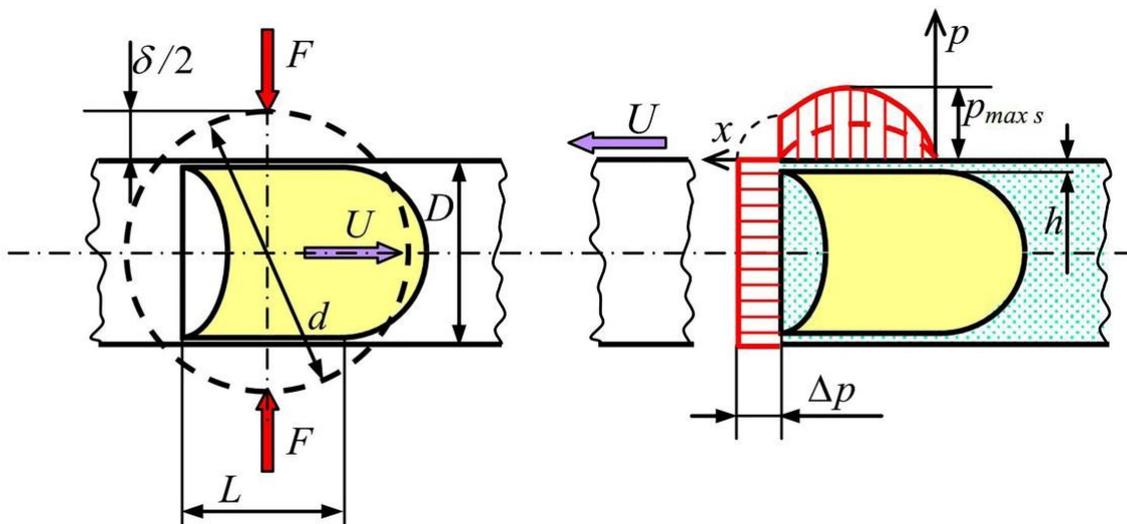


Figure 1-17. Schéma d'un érythrocyte dans capillaire étroit [53].

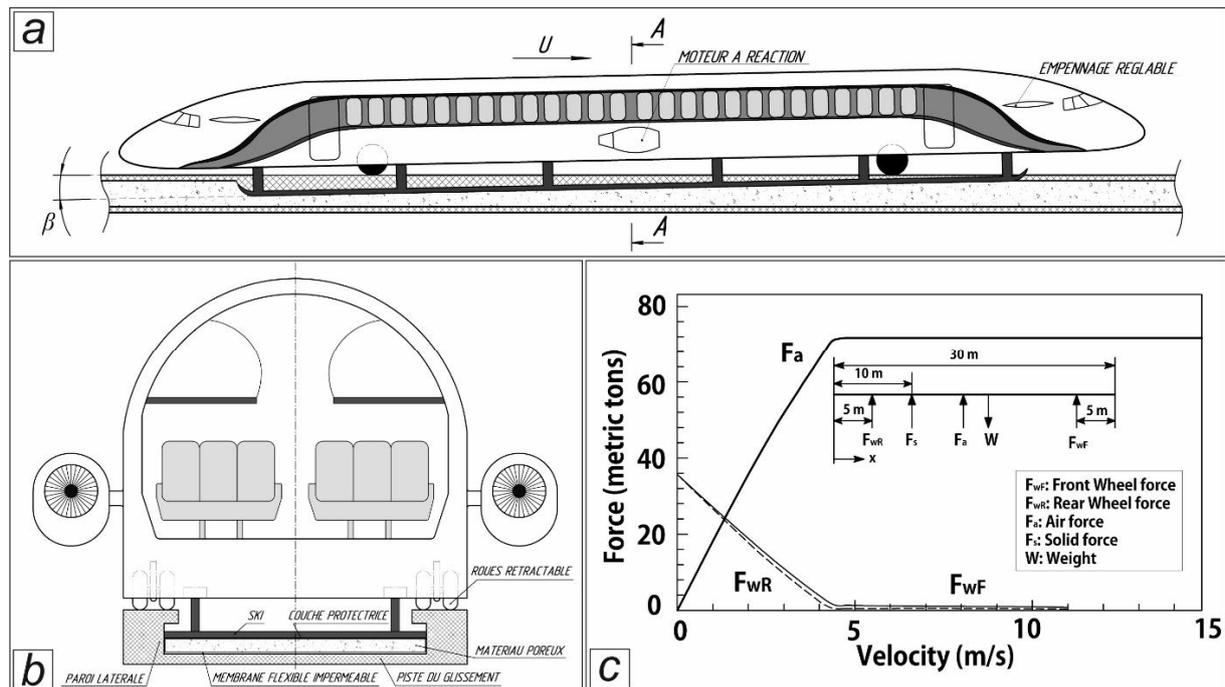
Cependant les recherches scientifiques de l'équipe de Bucarest ne se limitèrent pas seulement aux applications techniques de l'effet de la lubrification XPHD. C'est ainsi qu'ils abordèrent des problèmes scientifiques se trouvant à la frontière entre micro et nano tribologie, notamment la biotechnologie. Ainsi en 2007 Pascovici développa un modèle heuristique de la lubrification des érythrocytes dans les capillaires étroits [53]. Le modèle permet de résoudre un problème assez fascinant et compliqué, comme le mouvement des

érythrocytes dans le flux plasmatique. Ce flux se produit dans le glycocalyx endothélial – une structure poreuse qui est constituée des glycoprotéines et des protéoglycanes (Figure 1-17). Ce modèle heuristique est plus simple que les modèles existants dans ce domaine. Malgré ces simplifications, les résultats sont très proches des résultats des modèles plus complexes.

Outre-Atlantique, plus précisément aux États-Unis, on peut citer l'équipe de professeur Weinbaum qui s'intéressa aussi à la problématique du milieu poreux dans différentes applications.

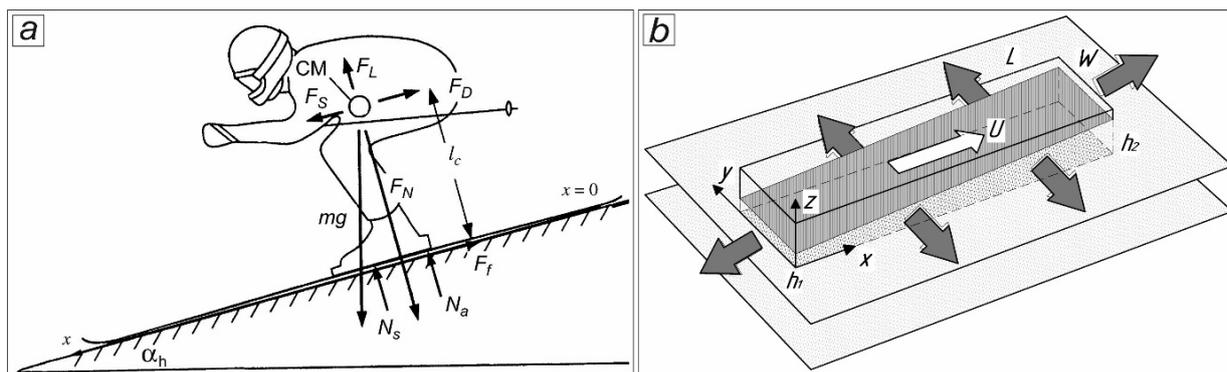
Par exemple, en 2009, Weinbaum déposa un brevet d'invention sur un train à grande vitesse avec une propulsion réactive glissant sur un support en matériau poreux (Figure 1-18a) [54]. Ce train est équipé d'un large ski qui lui permet, à partir d'une certaine vitesse, de coulisser sur une piste de glissement. Dans ce cas, la piste est formée par un matériau très poreux ( $\epsilon \geq 0,99$ ) rempli d'air. À son tour, le matériau poreux dispose d'une couche de protection et une membrane flexible imperméable pour éviter la fuite latérale de l'air (Figure 1-18b).

Le mouvement du train provoque la déformation du matériau poreux et donc l'écoulement de l'air à l'intérieur du matériau. Grâce à cela, la force de portance se génère suivant toute la longueur du ski (Figure 1-18c). D'après les calculs préliminaires, la piste glissante avec une épaisseur de matériau poreux de 10 cm peut supporter un train ayant une masse totale de 50 tonnes.



**Figure 1-18.** Train à grande vitesse de Weinbaum : a) vue générale ; b) section transversale ; c) variation des forces en fonction de la vitesse [54].

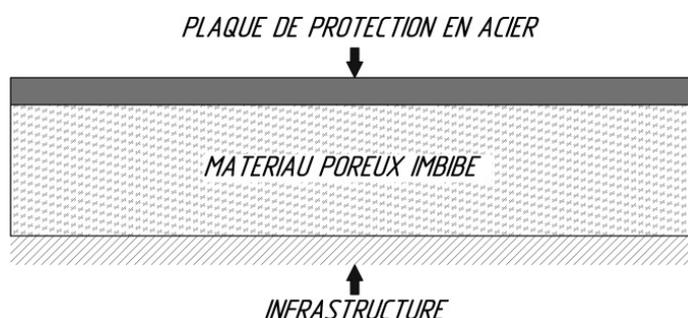
Dans le même temps, Weinbaum nota dans son travail [55] que l'utilisation de ce concept était possible pour le développement de paliers poreux avec une pression de lubrifiant considérablement élevée et une longue durée de vie.



**Figure 1-19.** Mécanique de glissement du ski d'après Weinbaum : a) les forces agissant sur le skieur lors d'une descente [56] ; b) illustration schématique du glissement du ski [57].

Des recherches similaires portèrent sur les processus de lubrification qui permettaient par exemple la glisse des skis sur la neige poudreuse [55, 56, 57, 58]. De cette manière, le ski alpin (Figure 1-19 a), dans sa représentation la plus simple, se réfère au mouvement d'un plan incliné sur un milieu poreux formé de cristaux de neige. À mesure que les couches de neige se compriment, l'air a tendance à s'échapper en dehors de la zone de compression, suivant la surface du contact (Figure 1-19 b). L'augmentation de la pression qui se produit permet de faciliter le glissement du ski sur la neige poudreuse.

En étudiant le glissement du ski, Weinbaum remarqua la similitude avec le mouvement des érythrocytes dans le glycocalyx. Par la suite, il proposa une théorie qui expliquait la nature de ce mouvement. Les travaux suivants [55, 58, 59] présentent la genèse des études de ce domaine.



**Figure 1-20.** Schéma d'une plaque d'amortissement du choc proposée par Dawson [63].

Depuis le début des années deux mille, le sujet de l'amortissement d'un impact d'énergie élevée par des matériaux poreux (produit par des ondes de choc par exemple) fait partie des sujets de recherches au MIT (Massachusetts Institute of Technology). C'est ainsi que Dawson étudia théoriquement et expérimentalement dans ces travaux [60, 61, 62] la force de résistance générée par la compression dynamique d'une mousse réticulée avec des pores ouverts imbibée de liquides newtoniens et non-newtoniens. Les résultats de ces recherches servirent de base à la conception technique présentée par Dawson en 2009 [63]. Cette conception présente un ensemble de plaques composites qui est destiné en particulier à la protection des structures porteuses des bâtiments en cas d'attaque terroriste (un véhicule rempli d'explosifs par exemple). Les plaques composites consistent en une couche supérieure en acier et une couche intérieure de matériau poreux imbibé d'un liquide (Figure 1-20). La

couche supérieure sert principalement à la protection de la structure intérieure de la plaque tandis que le rôle essentiel du milieu poreux est d'amortir le choc.

## I.7. Conclusion et but de cette étude

Le mécanisme de lubrification XPHD est un sujet de recherches innovant aussi bien qu'inter- et multidisciplinaire. Comme on peut le constater grâce à l'étude bibliographique, les phénomènes physiques sous-jacents à ce type de lubrification (souvent complexes et multi-échelle) peuvent être trouvés dans divers domaines des sciences.

Cependant, on peut noter que la majorité des recherches sont abordées dans des contextes autres que celui de la lubrification XPHD proprement dite, les travaux spécialement ciblés sur ce sujet étant très peu nombreux. Concernant les modèles numériques de lubrification XPHD, nous pouvons constater que les modèles proposés par Pascovici ne prenaient pas en compte les effets du frottement visqueux.

Pour notre équipe de recherche de l'Institut PPRIME, «Tribolub», le mécanisme de lubrification XPHD présente un sujet de recherche nouveau et inexploré. L'objectif principal de ce projet de recherche est donc l'évaluation des performances de la lubrification XPHD dans le cadre d'un mouvement tangentiel, adapté à l'étude de butées. Les objectifs principaux de ce travail de recherche sont les suivants :

- ❖ **Identification des matériaux-candidats poreux en corrélation avec des fluides lubrifiants pour répondre aux exigences de la lubrification XPHD** : propriétés pertinentes du fluide et de la structure du matériau poreux (porosité, perméabilité, tension superficielle) ; la compatibilité fluide-matériaux ; les propriétés élastiques du matériau poreux imbibé ; les propriétés et la stabilité d'écoulement à l'intérieur du matériau poreux imbibé.
- ❖ **Étude du processus de ré-imbibition du matériau poreux soumis à une compression en mouvement tangentiel**. La connaissance du mécanisme de ré-imbibition permettra d'évaluer le temps de réponse nécessaire au rétablissement de la couche poreuse imbibée ; ce mécanisme est un fondement de la lubrification XPHD.
- ❖ **Évaluation de la durabilité des matériaux-candidats poreux en fonction de différents paramètres** (perméabilité, porosité, élasticité), ainsi qu'en fonction des performances globales d'un palier de butée (coefficient de frottement, température, pression).

À travers les chapitres suivants nous essaierons de donner les réponses à toutes ces questions cruciales concernant la lubrification XPHD.

Ainsi, le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux poreux. En particulier, les méthodes et les techniques utilisées pour mesurer la porosité et la perméabilité de mousse en polyuréthane, ainsi que ces propriétés mécaniques via des essais de compression seront présentées. Les descriptions de tous les dispositifs expérimentaux, les difficultés rencontrées au cours de ces travaux, l'analyse des résultats des mesures et comparaisons avec des résultats de modélisation seront également abordées dans ce chapitre.

Le chapitre suivant se focalise sur une étude expérimentale et numérique de la lubrification XPHD. C'est ainsi que, le banc d'essais de la lubrification XPHD, les procédures d'essais, l'analyse des résultats expérimentaux ainsi qu'une étude consacrée à l'usure de mousse seront présentés. Par la suite, on décrira le modèle numérique, les hypothèses prises en compte aussi que ces limitations. À la fin on terminera ce chapitre par la comparaison des résultats expérimentaux avec des résultats des modélisations numériques.

Le chapitre final présentera la conclusion générale et des perspectives de ce travail de recherches.



# Chapitre II

## Caractérisation des matériaux poreux

Comme nous l'avons présenté dans la partie bibliographique, l'un des objectifs de ce travail de recherche est l'identification des matériaux-candidats poreux pour répondre aux exigences de la lubrification XPHD. Afin d'assurer le fonctionnement correct et fiable d'applications XPHD, les matériaux poreux doivent correspondre à un certain nombre de critères, qui sont cités ci-dessous :

- ❖ Bonne capacité de ré-imbibition pour différents taux de compression.
- ❖ Capacité à supporter la charge statique lors des phases critiques de démarrage et d'arrêt.
- ❖ Résistance à l'usure, stabilité chimique et longévité.

Après des recherches préliminaires et une analyse des matériaux poreux existants, la mousse en polyuréthane avec des pores ouverts fut choisie en tant que premier matériau-candidat. La mousse de polyuréthane consiste en deux phases : une phase solide, formée à partir du polyuréthane lui-même, et une phase qui peut être représentée par un liquide, un gaz ou le mélange des deux, en fonction de l'application concrète. Ce type de mousse est un matériau assez répandu et accessible, ainsi que peu coûteux. Néanmoins, il faut noter que ce choix ne présente pas le matériau poreux idéal pour notre application, mais permet d'effectuer aisément l'étude théorique et expérimentale, ainsi que d'évaluer les performances de la lubrification XPHD.

Dans une large gamme des mousses fabriquées par un fabricant allemand, trois types furent sélectionnées : Dimer Collar 2202, Dimer Collar 2404 et Dimer Collar 2406 (nous les nommerons par la suite 2202, 2404 et 2406 respectivement). Le bilan des caractéristiques techniques fournies par le fabricant est présenté dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1. Caractéristiques techniques des mousses.

Référence de la mousse	2202	2404	2406
Type de matériau	Polyuréthane	Polyuréthane	Polyuréthane
Couleur	Jaune	Blanche	Blanche
Densité apparente, kg/m <sup>3</sup>	20	40	36-39
Résistance à la compression 40 %, kPa	2,7	4,5	5,3-6,3
Résistance à la traction, kPa	130	>100	≥130
Allongement maximal à la traction, %	230	>140	≥160
Thermostabilité	-40°C – +100°C (courte durée 120°C)	-40°C – +120°C	
Vitesse de combustion, mm/min		<100	
Conditions de stockage	Dans un endroit sec ; ne pas exposer à la lumière directe du soleil ; température : max. 20°C ; humidité relative : 40-60%		

En analysant ce tableau dans le cadre de nos recherches, nous arrivâmes à la conclusion qu'il n'était pas suffisamment complet quant aux paramètres significatifs nécessaires à la lubrification XPHD, tels que la porosité et la perméabilité. C'est pourquoi nous décidâmes de déterminer ces paramètres par nous-mêmes. Les procédures et les méthodes de détermination de ces paramètres, ainsi que les résultats des essais de compression des mousses sèches et imbibées sont présentés dans ce chapitre.

## II.1. Observation au microscope

Il fut décidé de commencer la caractérisation des mousses par une observation simple au microscope. Le but de cette observation est de comprendre la structure intérieure des mousses, afin d'avoir une information qualitative initiale sur la taille et la forme des pores.

La Figure 2-1 présente les photographies de la structure macroscopique de chacune des mousses observées au microscope avec un grossissement 20x. On précise ici que le quadrillage fin en arrière-plan est issu de l'image d'une mire de calibration utilisée pour obtenir les tailles des pores.

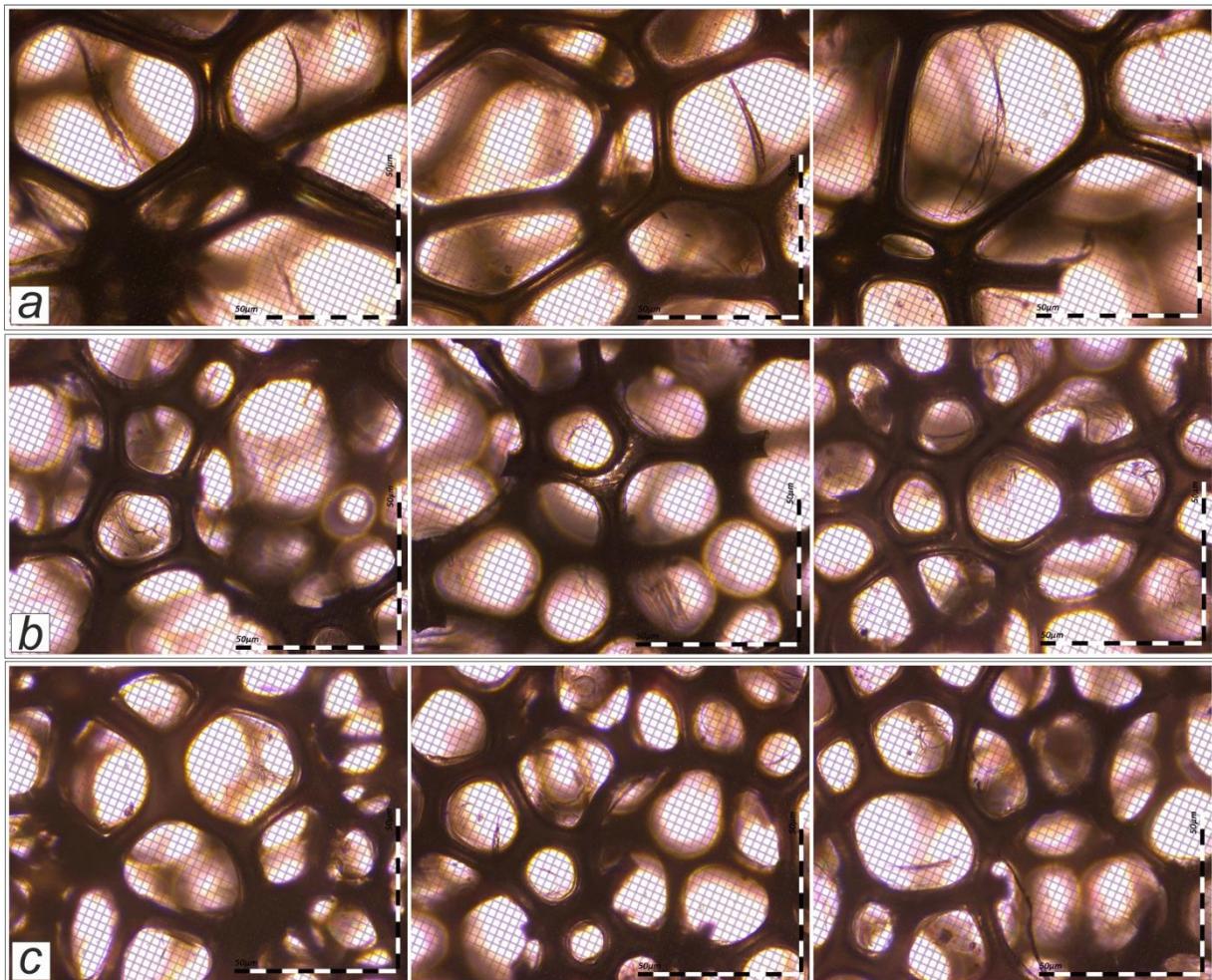


Figure 2-1. Mousses au microscope (grossissement x20) : a) 2202, b) 2404, c) 2406.

Cette observation nous permet de constater que la mousse 2202 a des pores de taille plus importante que les mousses 2404 et 2406. On peut également remarquer que certaines facettes des alvéoles contiennent des résidus de polyuréthane apparus après la réaction chimique de production de la mousse. Ces résidus peuvent être représentés par des protubérances ou des fils fins ainsi que, dans certains cas, par des membranes. Ces dernières peuvent former des pores partiellement ou complètement fermés qui sont capables de perturber ou de bloquer l'écoulement à l'intérieur de la mousse. Par conséquent, cela laisse supposer que ces résidus peuvent avoir une certaine influence sur la porosité et donc sur la perméabilité des mousses.

## II.2. Principes des mesures de porosité

Les mesures de porosité consistent à trouver le rapport entre le volume des pores ( $V_p$ ) et le volume total ( $V$ ) d'un échantillon de mousse. Pour mesurer la porosité des mousses, deux méthodes furent utilisées : la méthode d'imbibition et la méthode basée sur la tomographie par absorption de rayons X. L'utilisation de deux méthodes différentes permet d'obtenir des valeurs plus fiables de la porosité. La deuxième méthode donne, de plus, la possibilité de mesurer la porosité pour différentes épaisseurs de la mousse, ainsi que de reconstruire numériquement sa structure.

### II.2.1. Mesures de porosité par imbibition de mousse

La méthode d'imbibition se base sur la capacité du matériau poreux à absorber un liquide. La démarche suivante fut appliquée pour réaliser ce type de mesures (pour une meilleure compréhension, cette méthode est illustrée schématiquement sur la Figure 2-2) :

1. En utilisant un emporte-pièce sur une plaque de mousse (1000mm x 3000mm x 3mm), cinq échantillons de même taille sont découpés de manière aléatoire. Les échantillons sont caractérisés par deux dimensions géométriques : le diamètre  $D$  et l'épaisseur (ou hauteur)  $h$ . Le volume apparent de l'échantillon est ensuite calculé par la relation suivante :

$$V_{apparent} = \frac{\pi D^2}{4} h . \quad (2.1)$$

On mesure ensuite sa masse  $m_{mousse\ sèche}$  avant de l'accrocher à un support via un fil en inox.

2. La masse du bécher vide  $m_{bécher}$  et la masse d'un bâton de manipulation  $m_{bâton}$  sont mesurées.
3. De l'eau est versée dans le bécher et la masse d'eau initiale  $m_{H_2O\ initiale}$  est mesurée en déduisant la masse du bécher.
4. À l'étape suivante, l'échantillon est immergé dans le bécher avec l'eau. Pour assurer une imbibition maximale de la mousse, celle-ci est comprimée avec un bâton de manipulation et laissée dans l'eau pendant cinq minutes.

5. Ensuite, l'échantillon imbibé (par ailleurs, le bâton de manipulation est laissé dans le bécher) est retiré du bécher et la masse d'eau  $m_{H_2O}$  dans le bécher est à nouveau mesurée en déduisant la masse du bâton. Grâce à un calcul simple  $m_{H_2O\text{ initiale}} - m_{H_2O}$ , on obtient la masse d'eau absorbée par la mousse  $m_{H_2O\text{ absorbée}}$ . Sachant que le volume de l'eau absorbée est égal au volume des pores de l'échantillon, on obtient :

$$V_{H_2O\text{ absorbée}} = \frac{m_{H_2O\text{ absorbée}}}{\rho_{H_2O}} = V_{pores} \quad (2.2)$$

6. Enfin, la porosité de la mousse pour l'épaisseur initiale (i.e. pour la mousse non comprimée) est déterminée par :

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{pores}}{V_{apparent}} \quad (2.3)$$

7. Pour déterminer la porosité de la mousse pour différents taux de compression, on utilise l'expression analytique suivante :

$$(1 - \varepsilon_{comp})h_{comp} = (1 - \varepsilon_0)h_0 \quad (2.4)$$

avec  $\varepsilon_{comp}$  la porosité de la mousse comprimée,  $h_{comp}$  l'épaisseur de la mousse comprimée ;  $\varepsilon_0$  la porosité de mousse pour l'épaisseur initiale  $h_0$ .

Les mesures de porosité avec l'eau furent réalisées pour tous les trois types de mousse 2202, 2404 et 2406. Au cours de ces mesures nous remarquâmes que pour la mousse 2406, le temps nécessaire pour chasser l'air de l'intérieur de l'échantillon et donc pour l'imbiber fut plus long.

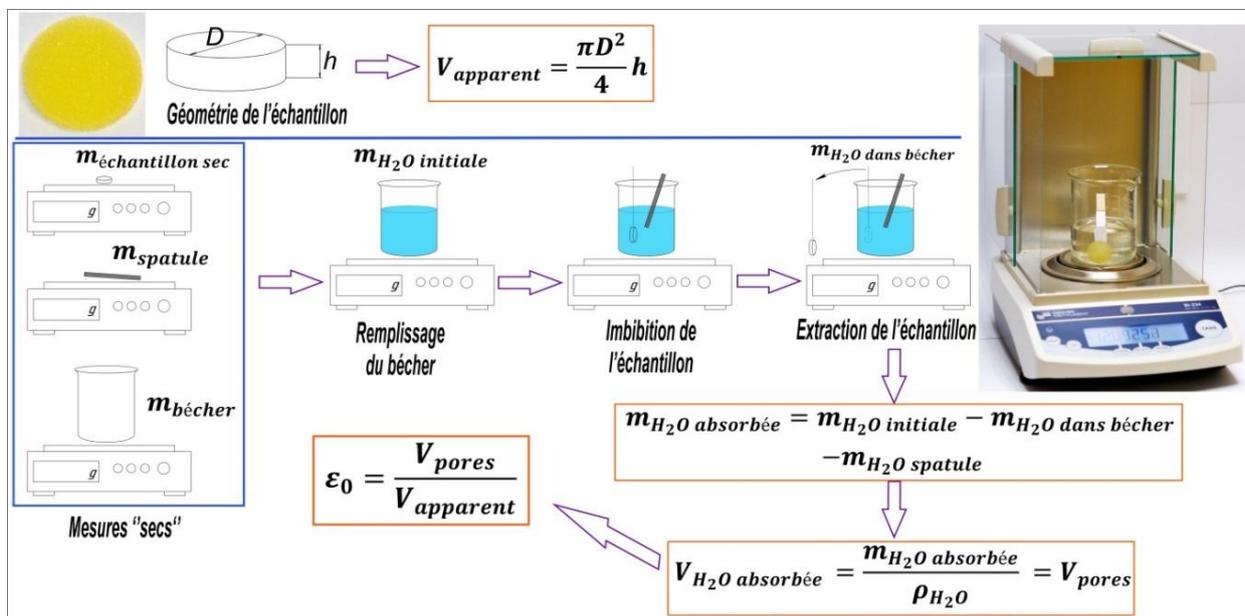


Figure 2-2. Mesures de la porosité par imbibition de la mousse.

La même démarche fut appliquée pour déterminer la porosité des mousses à l'huile ISO VG 46. Dû à la viscosité plus importante de l'huile par rapport à l'eau, nous rencontrâmes certaines difficultés, notamment avec l'extraction de l'air de l'intérieur de la mousse. Pour résoudre ce problème, l'imbibition de l'échantillon fut réalisée sous vide : le

bécher contenant l'huile et l'échantillon furent placés sous une cloche avec une atmosphère raréfiée par une pompe à vide.

Les bilans des mesures de la porosité des mousses à l'eau et à l'huile sont présentés dans les Tableaux 2-2 et 2-3. Ces tableaux contiennent des valeurs de la porosité pour tous les échantillons ainsi que les valeurs moyennes pour trois mousses étudiées. Dans les tableaux nous pouvons trouver certaines valeurs qui sont supérieures à 1, ce qui n'est pas physiquement correct, mais montre les incertitudes et les imprécisions de cette méthode de mesure.

**Tableau 2-2.** Bilan des mesures de la porosité de mousse à l'eau.

N° de l'échantillon	Porosité à l'eau		
	2202	2404	2406
1	0,944	0,931	0,856
2	<u>1,010</u>	0,957	0,891
3	0,963	0,988	0,798
4	0,929	0,978	0,859
5	0,924	0,880	0,822
<b>Moyenne</b>	<b>0,953</b>	<b>0,947</b>	<b>0,845</b>

**Tableau 2-3.** Bilan des mesures de la porosité de mousse à l'huile ISO VG 46.

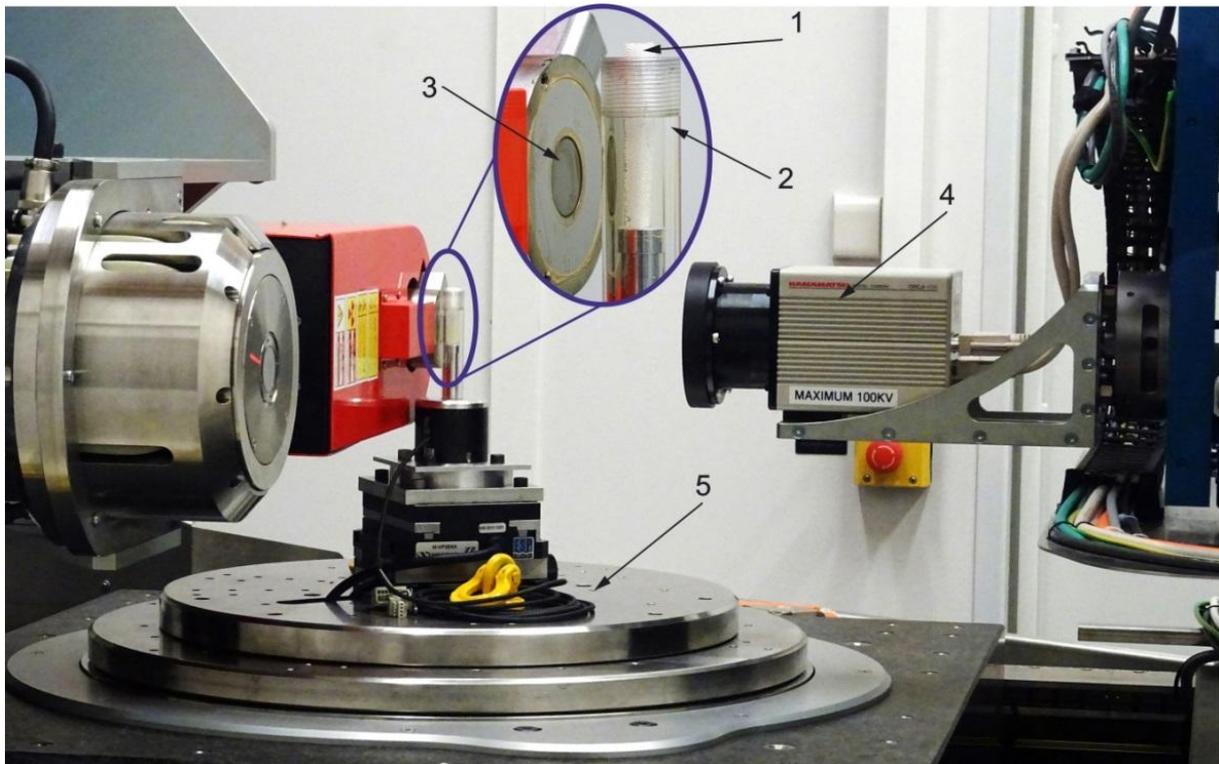
N° de l'échantillon	Porosité à l'huile ISO VG 46 (sous vide)		
	2202	2404	2406
1	0,876	<u>1,020</u>	0,952
2	0,960	0,994	0,943
3	0,935	<u>1,010</u>	0,952
4	0,969	0,952	1,000
5	0,952	0,901	0,926
<b>Moyenne</b>	<b>0,938</b>	<b>0,975</b>	<b>0,955</b>

## II.2.2. Mesure de la porosité par tomographie à rayons X

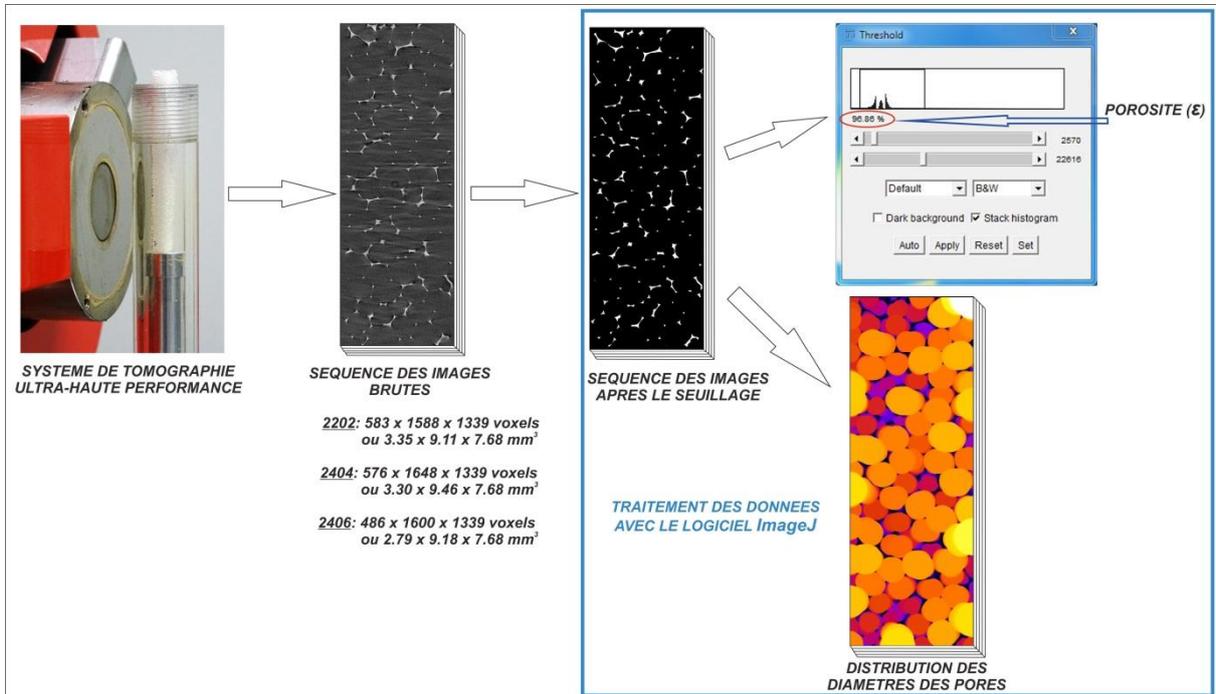
La méthode de mesure de la porosité avec le tomographe repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X avec un matériau étudié. La tomographie permet d'accéder à l'intérieur du matériau, et également de localiser très finement toutes les singularités, les hétérogénéités et les vides présents en son sein.

Pour réaliser les mesures de porosité, le système de tomographie ultra-haute performance RX Solution UltraTom dont la vue générale est présentée Figure 2-3 fut utilisé. Ce tomographe permet d'effectuer les mesures avec la précision 5,74 µm.

Avant de commencer les mesures, un échantillon de mousse de forme rectangulaire est inséré dans un support représenté par un tube de section circulaire en plexiglas. Ce tube est ensuite positionné à côté de l'émetteur de rayons X. Sur le côté opposé, deux types de capteurs peuvent être utilisés : soit un capteur CCD à très haute sensibilité et résolution, soit un capteur Plan Matriciel à haute résolution et haute vitesse d'acquisition.



**Figure 2-3.** Système de tomographie ultra-haute performance RX Solution UltraTom [1 – échantillon, 2 – tube transparent, 3 – émetteur de rayons X, 4 – capteur CCD, 5 – platine de rotation et axes de translations].



**Figure 2-4.** Traitement des images microtomographiques avec le logiciel ImageJ.

La source de rayonnement X et le détecteur sont fixes alors que le tube comportant l'échantillon est monté sur une platine horizontale permettant la rotation dans le champ autour d'un axe vertical. Le faisceau du rayonnement X passe à travers l'échantillon et est capté par

le détecteur, qui délivre les signaux analogiques issus de la création d'un courant proportionnel au nombre de photons reçus.

Le balayage s'effectue couche par couche avec un pas prédéfini. Les données acquises lors de la prise de mesures sont collectées suivant de multiples orientations et ensuite corrélées entre elles pour assurer la plus exacte reconstruction de l'échantillon. À l'aide de ces données, les images numériques sont calculées et reconstruites en niveaux de gris. Chaque niveau de gris permet d'exprimer, point par point, le coefficient d'atténuation local du faisceau incident, correspondant en fait à une échelle de densité.

Les résultats des mesures microtomographiques sont représentés par une séquence de 1339 images brutes. Pour avoir la possibilité d'étudier ces images, elles doivent d'abord être traitées, ce qui est réalisé à l'aide du logiciel ImageJ (Figure 2-4). Pour cela, les images brutes codées sur 32 bits sont échantillonnées à une plage d'intensité de 8 bits pour diminuer le temps d'exécution de différents traitements ; tout en conservant la dynamique des niveaux de gris. Pour chaque séquence d'images, un sous-volume est extrait afin d'éviter les effets parasites sur les bords, provoqués à la fois par la coupe de l'échantillon, par le support en plexiglass ou par la source conique de rayons X.

À l'étape suivante, un seuillage des séquences d'images est réalisé. Les images sont binarisées : les images initiales codées sur 255 niveaux de gris, sont transformées en images contenant seulement des pixels de couleurs noire et blanche. Le seuillage est effectué de telle sorte que l'on puisse avoir des images de la structure de l'échantillon étudié nettes (i.e. sans artefacts ou bruits parasites).

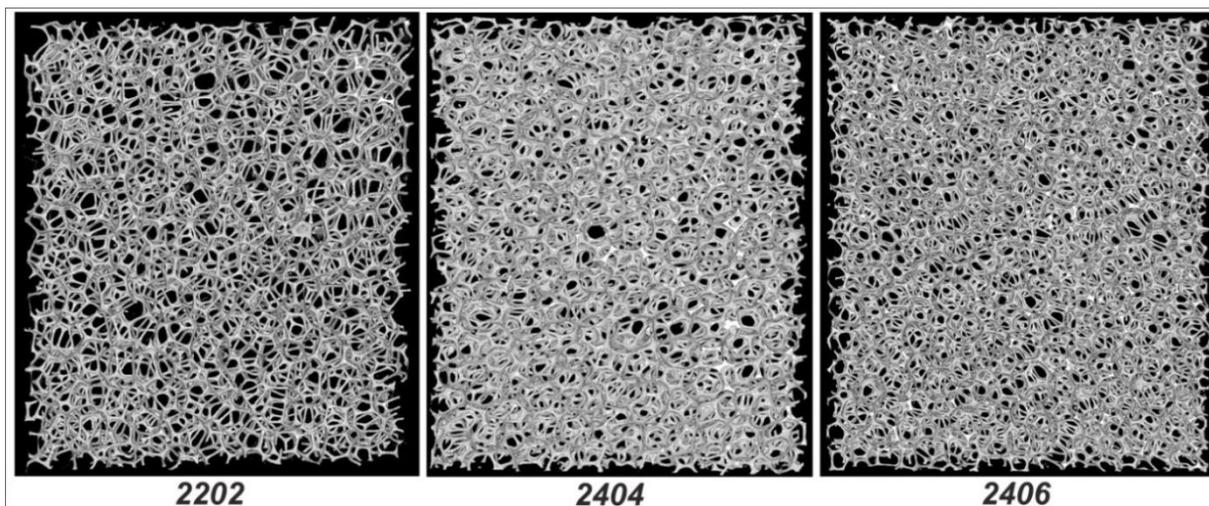
Le seuillage permet ainsi d'établir le pourcentage de la couleur noire (vides) et blanche (matière) pour toutes les images représentant l'échantillon et donc d'obtenir directement la porosité des mousses (Tableau 2-4).

**Tableau 2-4.** Bilan des mesures de porosité.

Mousse	Porosité		
	Imbibition avec l'eau	Imbibition avec l'huile	Tomographe (mousse sèche)
2202	0,953	0,938	0,980
2404	0,947	0,974	0,960
2406	0,845	0,955	0,970

La reconstruction tridimensionnelle de l'échantillon peut être réalisée grâce aux mêmes images binarisées. Elle s'effectue couche par couche suivant l'axe vertical. Les résultats de cette reconstruction sont présentés Figure 2-5.

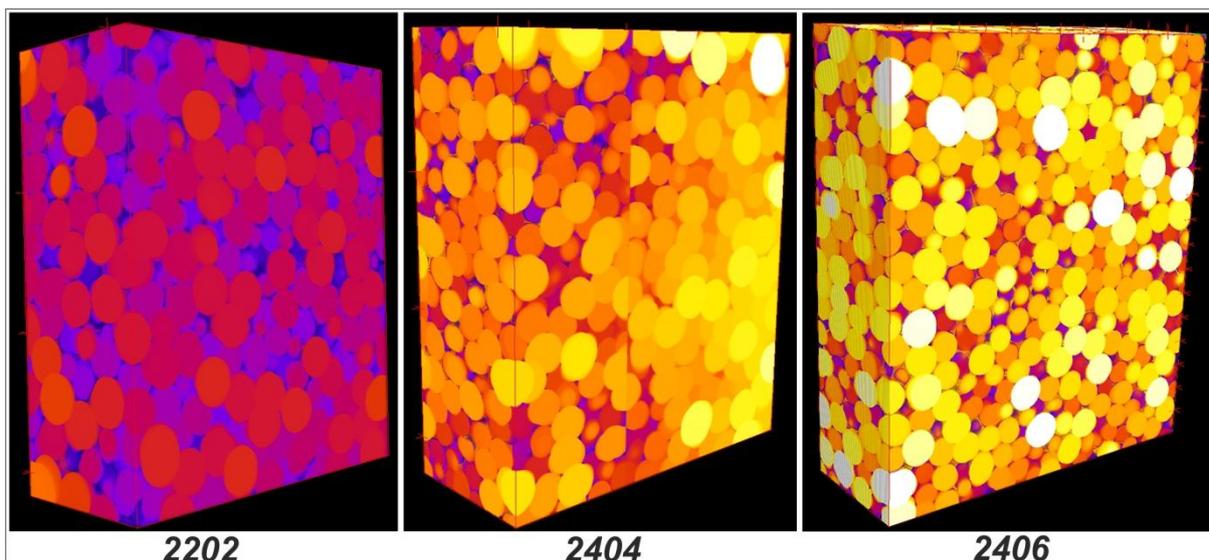
La détermination des diamètres moyens des pores est réalisée avec les mêmes séquences d'images binarisées que celles utilisées pendant l'opération de reconstruction. En remplaçant les zones noires qui représentent les pores, par des sphères de diamètres variables, on obtient une séquence d'images avec des cercles/ovales de couleurs différentes (Figure 2-6). Chaque couleur correspond à un diamètre moyen de sphère. La reconstruction de cette séquence d'images forme donc un volume rempli de sphères, avec des vides aux endroits où elles ne sont pas en intersection. Ainsi, le volume des vides est conforme au volume occupé par la matière de la mousse.



**Figure 2-5.** Reconstruction tridimensionnelle de la structure des mousses.

Cette nouvelle séquence d'images est ensuite analysée pour en extraire un histogramme donnant les populations de sphères d'une même couleur. L'histogramme donne en fait le nombre de pixels affectés à chaque couleur dans le volume considéré. Connaissant le diamètre des sphères et le nombre de pixels associés correspondant à chaque couleur (Figure 2-7), on peut déterminer le nombre de sphères d'un même diamètre contenu dans le volume. En recalculant le volume d'une sphère de chaque couleur, il est donc possible de trouver le diamètre moyen des pores ainsi que leur représentation quantitative.

Cependant, il est important de noter qu'en faisant ce calcul, le volume total des pores d'un diamètre donné est considéré comme composé de sphères entières. En réalité, dans la zone au niveau des parois, certaines sphères sont inévitablement tronquées comme on peut le voir sur la Figure 2-6. Le volume de ces sphères tronquées est traduit en volume de sphères entières dans le domaine étudié. Ce calcul permet néanmoins d'avoir une idée de la distribution des pores dans les mousses et donc d'utiliser par la suite cette information pour reconstruire numériquement le matériau poreux.



**Figure 2-6.** Reconstruction tridimensionnelle de la structure des échantillons des mousses formées par des sphères.

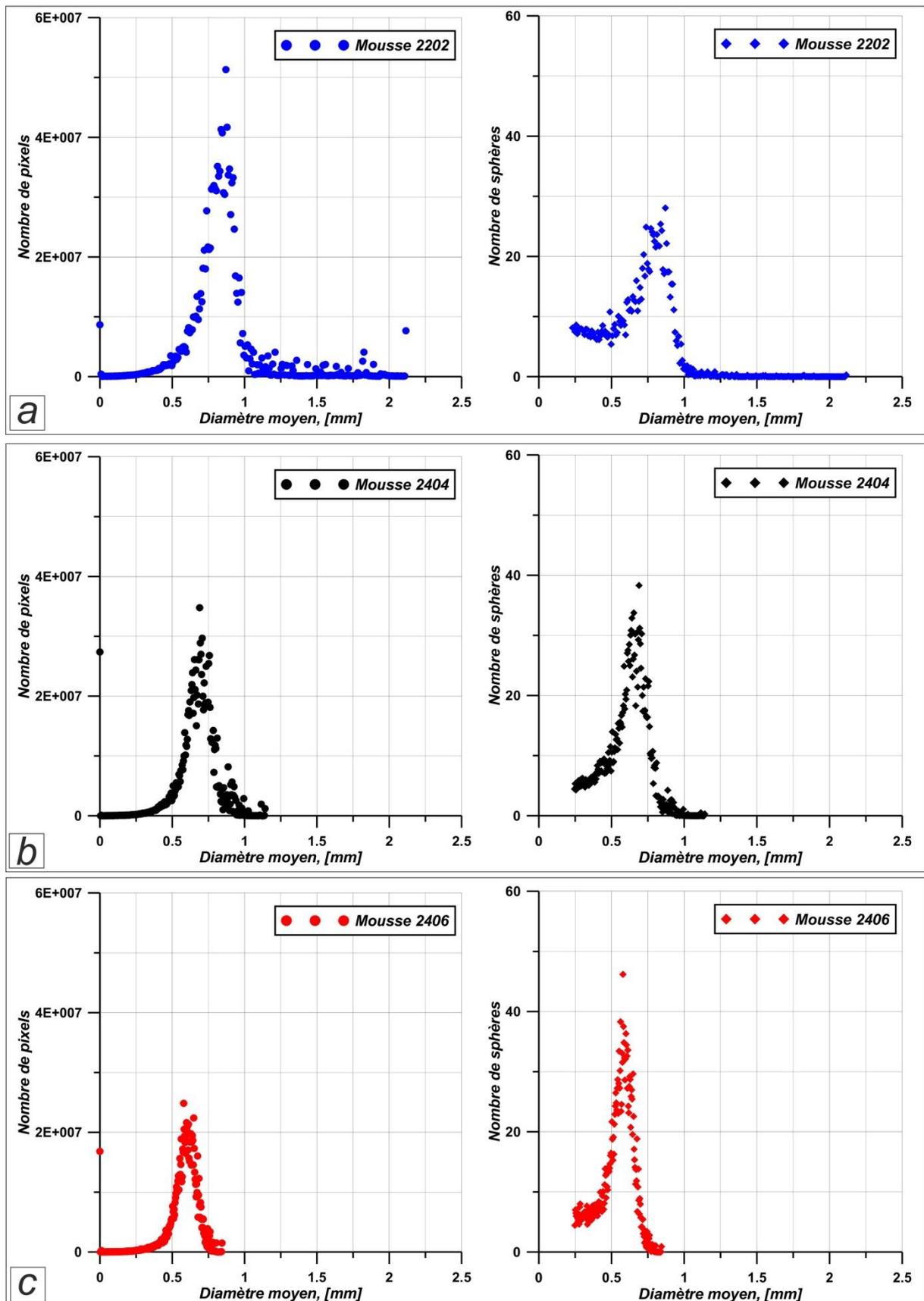
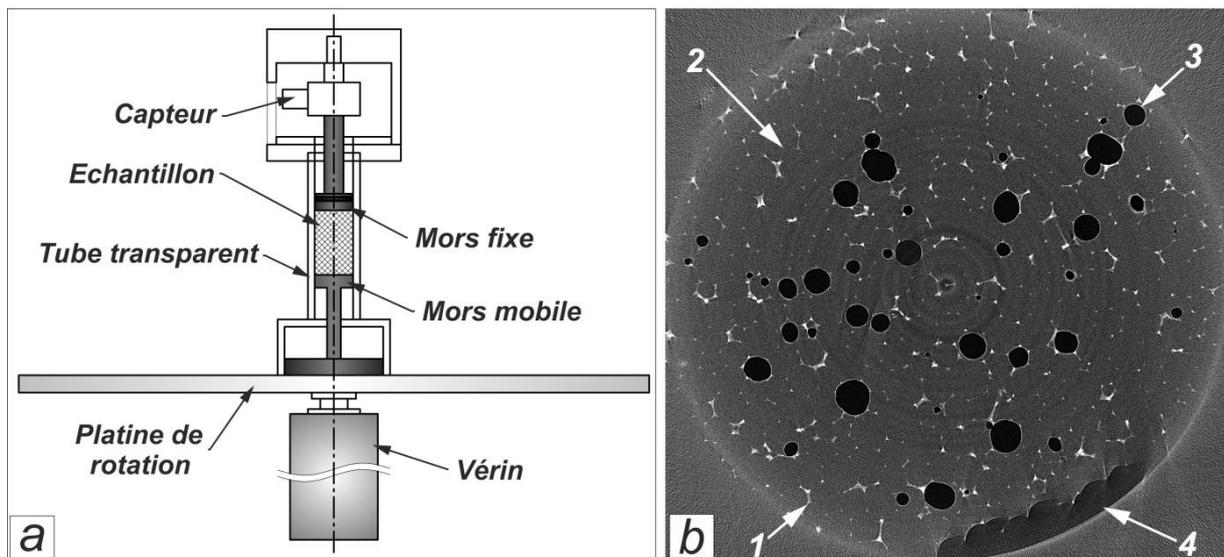


Figure 2-7. Distribution des pores dans les échantillons des mousses : a) mousse 2202, b) mousse 2404, c) mousse 2406.

## II.2.3. Mesure de la porosité d'une mousse comprimée par tomographie à rayons X

Une étude supplémentaire fut réalisée pour la mousse 2404 dans le but d'obtenir la variation de la porosité pour différents taux de compression. Ces mesures furent effectuées par Erwan FORT durant son stage de master à l'Institut PPRIME au sein du Département GMSC (Génie Mécanique et Systèmes Complexes) sous la direction de Pascal DOUMALIN et Jean BOUYER. Pour cela, un échantillon de mousse de forme cylindrique est utilisé (diamètre 9mm et hauteur 10mm). Cet échantillon est déposé dans un tube transparent entre les mors fixe et mobile d'une machine de chargement, qui est à son tour fixée sur la platine rotative du tomographe (Figure 2-8a).

La variation du taux de compression s'effectue grâce au mouvement de translation du mors mobile à l'intérieur du tube. La procédure de mesure ainsi que la méthode de traitement des images sont les mêmes que pour les mesures de porosité des mousses non-comprimées. Cinq taux de compression de la mousse furent traités en état sec et deux à l'état initial, avant et après plusieurs cycles de compression. Afin de mieux comprendre le comportement de l'huile lors de l'imbibition à l'intérieur de la mousse, des mesures furent également réalisées sur un échantillon imbibé.



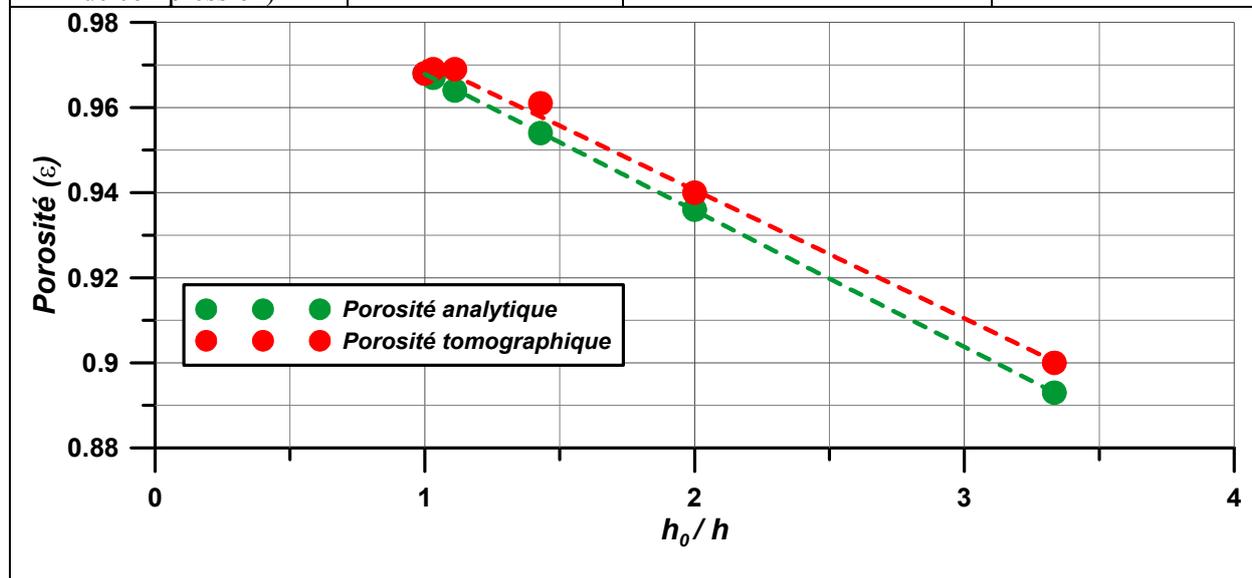
**Figure 2-8.** Mesure de la porosité d'une mousse comprimée : a) machine de chargement, b) image brute d'une mousse imbibée [1 – structure solide de la mousse, 2 – huile présente dans un pore, 3 – air piégé dans l'échantillon, 4 – air hors échantillon].

En analysant les résultats des mesures présentés dans le Tableau 2-5 ci-dessous, on peut constater que la porosité diminue proportionnellement à l'épaisseur de la mousse. Cette variation de la porosité peut être expliquée par la déformation des parois et donc par la diminution du volume total des pores. Cette étude supplémentaire nous permet de valider expérimentalement l'équation analytique (2.4) qui établit la relation entre la porosité initiale et la porosité du matériau poreux comprimé. Cette loi de variation de la porosité en fonction du taux de compression sera utilisée ensuite dans les calculs et les modélisations numériques. En

outre, le traitement des images brutes de l'échantillon imbibé nous donna la possibilité de faire une observation intéressante : comme on peut le constater sur la Figure 2-8b, malgré qu'il soit pré-imbibé manuellement, l'huile ne sature pas complètement l'échantillon et on constate la présence d'air piégé entre les parois. À mesure que l'échantillon est comprimé, l'huile a tendance à s'échapper tandis qu'une certaine quantité de bulles d'air reste à l'intérieur de la mousse dû à l'effet interfacial (Figure 2-8b).

**Tableau 2-5.** Résultats des mesures de porosité de la mousse 2404 comprimée sèche.

Épaisseur, mm	Porosité analytique	Porosité tomographique	Erreur, %
10 (mousse neuve)	0,968	0,968	
9,7	0,967	0,969	0,206
9	0,964	0,969	0,516
7	0,954	0,961	0,728
5	0,936	0,94	0,425
3	0,893	0,9	0,777
10 (après plusieurs cycles de compression)	0,968	0,969	0,103



## II.2.4. Bilan des mesures de la porosité

La reconstruction tridimensionnelle de la structure des mousses et l'analyse de la distribution des pores nous permirent de confirmer la variation des tailles des pores faites pendant l'observation au microscope.

Ainsi, l'échantillon de mousse 2202 est constitué des pores de taille plus importante en comparaison avec les autres mousses. Les pores les plus représentés ont un diamètre d'environ 0,870 mm, le diamètre moyen des pores égal 1,173 mm tandis que le diamètre maximal peut atteindre environ 2,115 mm (Figure 2-7a).

Au contraire, l'échantillon de mousse 2406 est formé à base de pores relativement petits : les pores les plus nombreux ont un diamètre 0,579 mm, le diamètre moyen est de 0,546 mm et le diamètre maximal des pores ne dépasse pas 0,844 mm. De plus, on peut

remarquer qu'une majorité de pores de l'échantillon ont des diamètres compris entre 0,2 et 0,5 mm (Figure 2-7c).

La mousse 2404 occupe quant à elle une place intermédiaire entre les deux mousses précédemment abordées : la distribution des pores est plus uniforme par rapport aux autres mousses ; les pores de diamètre 0,689 mm sont les plus représentés au sein de l'échantillon et la gamme de diamètre évolue dans une plage allant de 0,246 mm jusqu'à 1,141 mm. Le diamètre moyen des pores égal 0,667 mm (Figure 2-7b).

Les distributions des points expérimentaux représentant le nombre des sphères en fonction de diamètre moyen correspondent à la distribution de type Gaussienne avec des écarts types ( $\sigma$ ) et des coefficients d'asymétrie ( $\gamma_1$ ) suivant :  $\sigma_{2202}=0,547$  mm,  $\sigma_{2204}=0,260$  mm,  $\sigma_{2406}=0,173$  mm et  $\gamma_{12202}=0$ ,  $\gamma_{12204}=0$ ,  $\gamma_{12406}=1,020$ .

En analysant les résultats des mesures de porosité obtenus par imbibition à l'eau et à l'huile données dans le Tableau 2-4, on remarque que les valeurs sont différentes. La porosité mesurée par imbibition de la mousse varie en fonction du liquide utilisé. Cette variation est probablement due à la viscosité et à l'effet de tension superficielle. En effet, l'huile est beaucoup plus visqueuse que l'eau, tandis que la tension superficielle de l'eau est beaucoup plus importante que celle de l'huile. Ces différences entre les propriétés des liquides engendrent des comportements différents variant avec la structure des mousses.

Néanmoins, l'effet de la présence d'air à l'intérieur de la mousse doit toujours être pris en compte. En dépit de l'imbibition des mousses dans une atmosphère raréfiée, une certaine quantité d'air reste piégée au sein de l'échantillon et a, par conséquent, un impact négatif sur les résultats des mesures.

Il peut sembler que la différence entre les résultats des mesures de la porosité à l'eau et à l'huile est négligeable ( $\Delta_{2202}=1,57\%$ ,  $\Delta_{2404}=2,85\%$ ,  $\Delta_{2406}=13,02\%$ ), mais en cas de calculs ou de modélisations numériques, cette variation aura un effet important sur les résultats finaux. C'est pourquoi les résultats des mesures de la porosité avec le tomographe à rayons X furent retenus pour l'étude suivante. Ces valeurs sont en effet plus vraisemblables car elles furent obtenues par une analyse directe de la structure géométrique de la mousse, sans introduire une quelconque interaction avec un fluide.

## II.3. Principes des mesures de la perméabilité

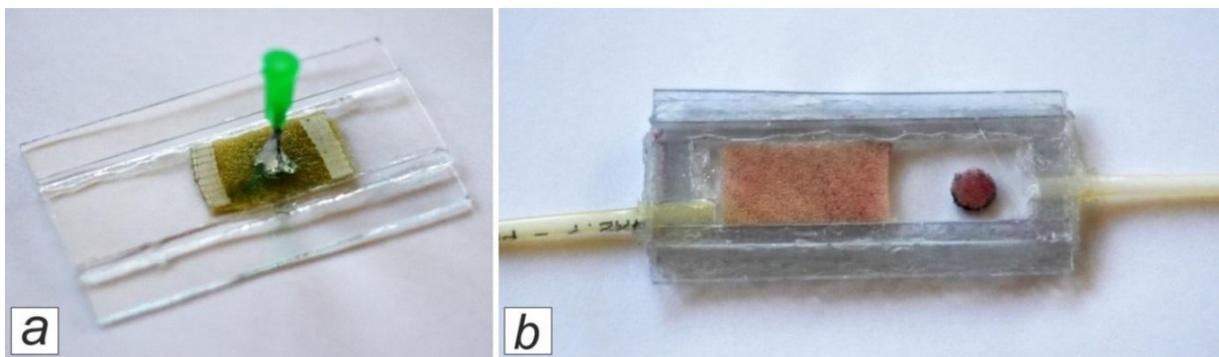
Cette étude est focalisée surtout sur la mousse 2404, qui montra les meilleures caractéristiques de fonctionnement suite aux tests de vérification du fonctionnement du banc d'essais de butées XPHD. L'idée essentielle des mesures de perméabilité qui seront décrites dans cette partie est de déterminer le débit d'un liquide à travers un échantillon pour différents gradients de pression et différents taux de compression. La perméabilité sera ensuite calculée à partir de la loi d'écoulement à l'intérieur de la mousse. À cet effet, deux types de perméamètres furent conçus au sein de notre laboratoire : un perméamètre longitudinal et un perméamètre axisymétrique. Cependant, avant de présenter ces dispositifs expérimentaux et les résultats obtenus, nous allons présenter la phase initiale de l'étude pour assurer une bonne compréhension.

### II.3.1. Observation d'écoulement au sein de la mousse à l'échelle microscopique

Au début de nos recherches, nous nous intéressâmes à l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux à l'échelle microscopique. Pour cela nous utilisâmes deux dispositifs expérimentaux présentés sur la Figure 2-9.

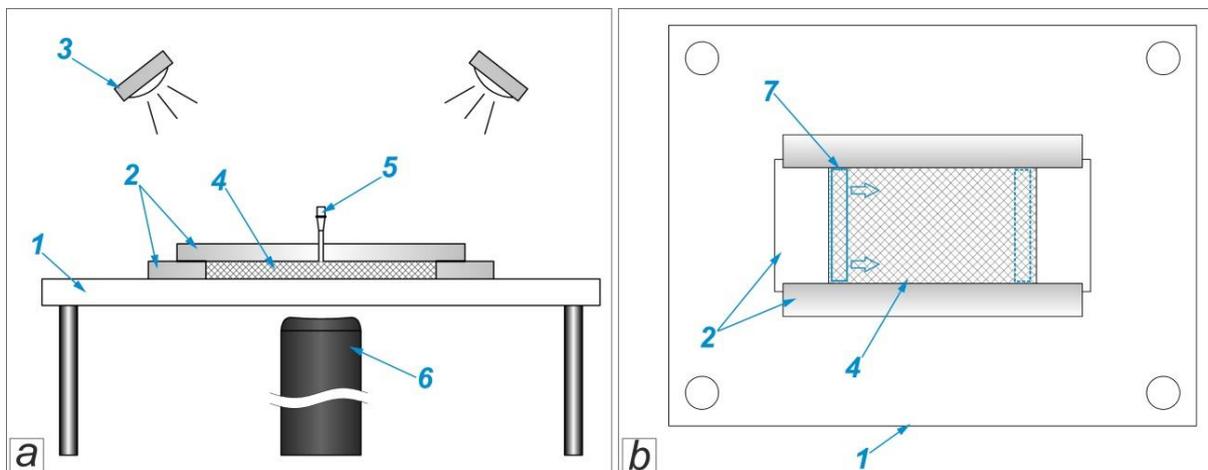
Ces dispositifs présentent une construction très simple, conçus à l'aide des lames porte-objet d'une épaisseur de 1 mm assemblées avec du silicone, entre lesquelles on fixe un échantillon de mousse. Le dispositif préparé est posé sur un support en verre transparent, équipé d'une source de lumière spécialement focalisée sur l'échantillon (Figure 2-10a).

L'injection d'un fluide peut s'effectuer dans le sens radial ou longitudinal suivant le dispositif utilisé. L'observation est réalisée via un vidéomètre connecté à un ordinateur.



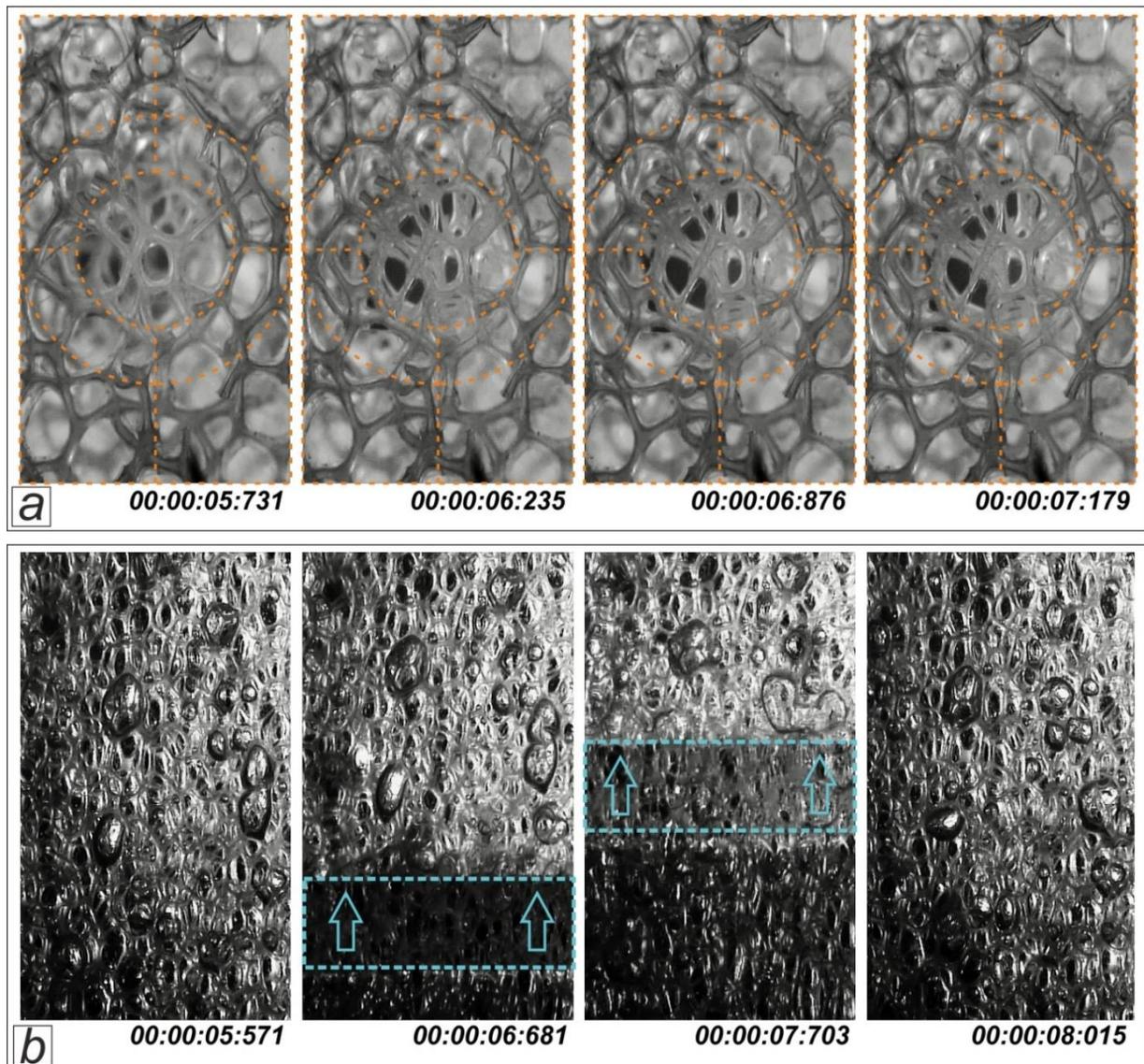
**Figure 2-9.** Dispositifs expérimentaux pour étudier l'écoulement dans un milieu poreux : a) dispositif plan radial, b) dispositif plan longitudinal.

Malgré leur simplicité, ces dispositifs permettent de faire des observations intéressantes et de mieux comprendre le comportement de la structure de mousse lorsqu'elle subit différentes déformations, ainsi que son interaction avec un fluide. Quelques expériences réalisées grâce à ces dispositifs sont présentées ci-dessous.



**Figure 2-10.** Schémas des dispositifs expérimentaux : a) injection d'air au milieu de l'échantillon, b) passage d'un dislocateur [1 – support en verre transparent, 2 – lames porte-objet, 3 – source de lumière, 4 – échantillon de mousse, 5 – conduit, 6 – vidéomètre, 7 – dislocateur].

Les images présentées sur la Figure 2-11a montrent par exemple les résultats de l'injection d'air via un conduit au centre d'un échantillon inséré dans le dispositif plan radial (Figure 2-10a). La pression est augmentée progressivement jusqu'à environ 3 bars. L'échappement de l'air s'effectue par les bords latéraux ouverts du dispositif. Les images présentent l'évolution de la structure de la mousse, la pression d'alimentation variant de la pression minimale jusqu'à la pression maximale de gauche à droite. On voit distinctement la déformation de la structure de la mousse dans la zone proche du conduit ; l'augmentation des tailles de certains pores et la diminution des autres. On remarque également que, dû à la compliance du polyuréthane, la structure reprend sa forme initiale lorsque l'alimentation en air comprimé est coupée.



**Figure 2-11.** Résultats des observations : a) injection d'air au milieu de l'échantillon, b) passage d'un dislocateur.

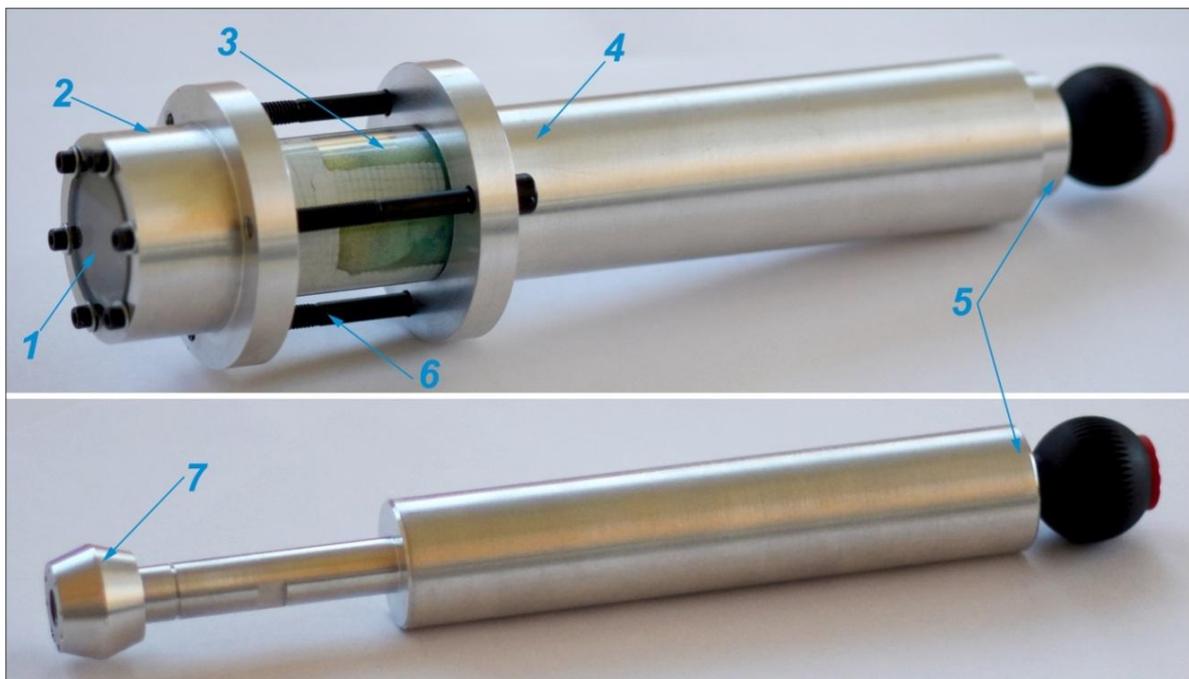
Les résultats d'une autre expérience sont présentés Figure 2-11b. Cette fois-ci, on s'intéressa au comportement de la structure de mousse imbibée suite au passage d'un dislocateur (Figure 2-10b). Pour réaliser cette expérience, un échantillon de la mousse est fixé

dans un canal formé par des lames porte-objet, et placé sur le support en verre transparent. Après l'imbibition de l'échantillon, cette construction représente une sorte de piste de glissement. Le dislocateur est constitué d'un bâton en plexiglass de section rectangulaire, qui se déplace sur cette piste en comprimant l'échantillon de mousse. Comme dans l'exemple précédent, l'observation est effectuée via un vidéomètre placé sous le support en verre.

Avant de commencer les manipulations, on remarque la présence des bulles d'air au sein de l'échantillon. Suite au passage du dislocateur, l'air n'est pas chassé complètement de la mousse ; certaines bulles se regroupent et se déplacent à l'intérieur de l'échantillon. Par ailleurs, la déformation de la structure se produit suivant deux sens privilégiés : suivant l'axe vertical et longitudinal. On constate respectivement la compression et l'allongement de l'échantillon étudié. Néanmoins, juste après le passage du dislocateur la structure de la mousse reprend sa forme initiale.

Les résultats de ces observations furent discutés avec nos collègues de l'Université Polytechnique de Bucarest, en particulier avec le Professeur M.D. Pascovici. Suite à cet échange, un dispositif d'observation complémentaire, présenté sur la Figure 2-12 fut élaboré. L'idée essentielle de ce dispositif est d'essayer d'observer l'interaction d'un dislocateur avec une mousse imbibée pour un taux de compression contrôlé.

Le dispositif consiste en une partie inférieure et une partie supérieure, entre lesquelles se trouve un tube en plexiglass de diamètre intérieur 32 mm. L'assemblage est fait de telle manière qu'il permet d'avoir une construction étanche et donc de contenir un liquide. Un échantillon de mousse est fixé à l'intérieur du tube via un ruban double face. L'éclairage supplémentaire de l'échantillon est prévu à travers un hublot situé à l'extrémité de la partie inférieure. Le mouvement de translation du piston plongeur est assuré par deux bagues de guidage insérées dans la partie supérieure. À l'extrémité du piston se trouve un dislocateur de diamètre 28 mm avec des orifices de recyclage de l'eau.

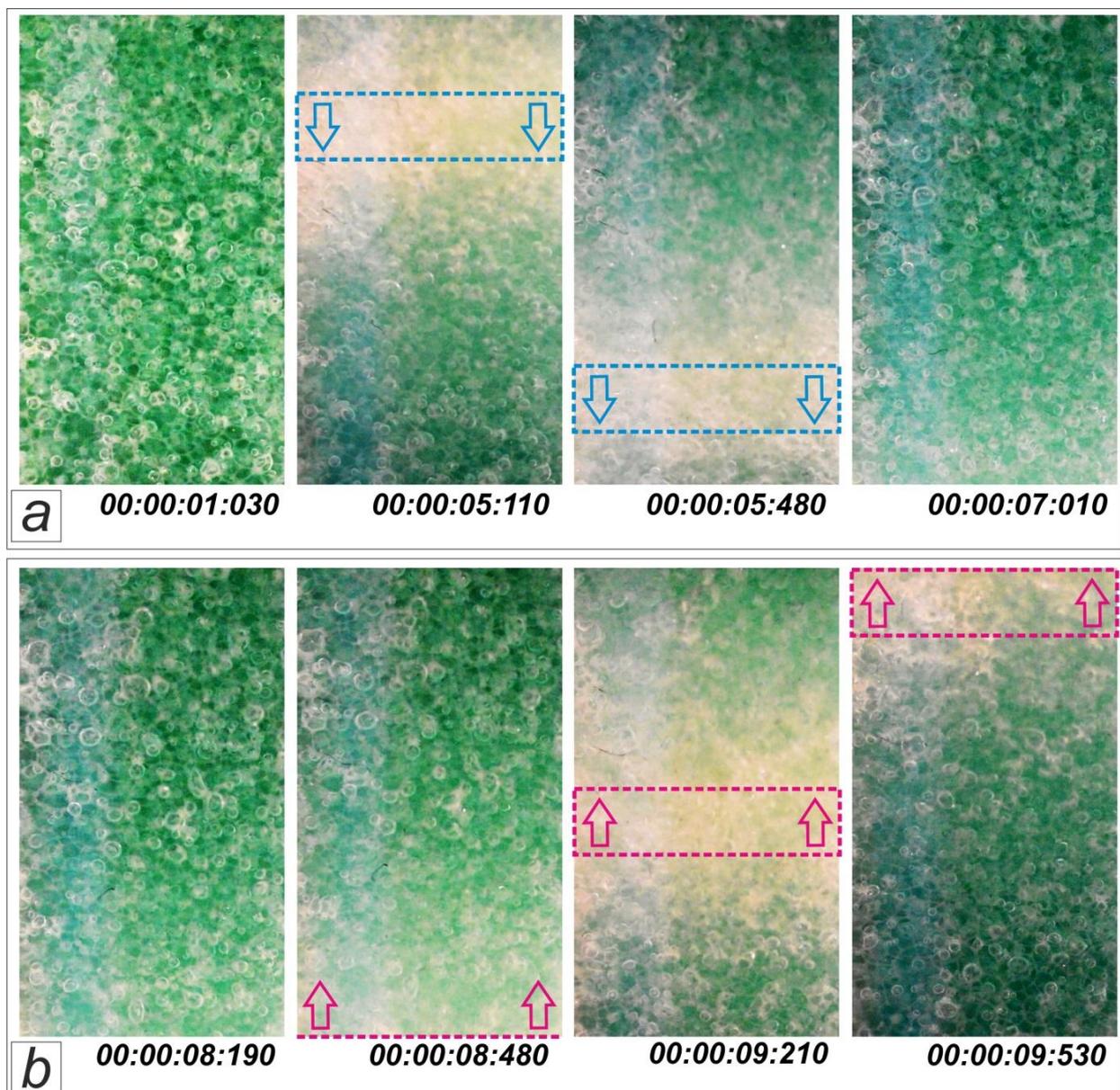


**Figure 2-12.** Dispositif d'observation [1 – hublot d'éclairage, 2 – partie inférieure, 3 – tube en plexiglass avec une mousse fixée à l'intérieur, 4 – partie supérieure, 5 – piston plongeur, 6 – vis d'assemblage, 7 – dislocateur].

Les images présentées Figure 2-13 illustrent quelques exemples des résultats obtenus au cours de cette expérience. Premièrement, on peut noter que la zone d'observation (i.e. la zone entourée d'un ruban double face) est plus importante que pour les dispositifs décrits précédemment. Et donc, la déformation de la structure de l'échantillon suivant le sens de déplacement du piston plongeur est plus significative.

En observant la zone de compression, on voit que l'eau a tendance à s'échapper à l'extérieur de cette zone. Néanmoins, après le passage du dislocateur, la mousse se ré-imbibe et sa structure reprend sa forme initiale. Cependant, on remarque qu'après quelques passages du dislocateur, les bulles d'air sont toujours présentes à l'intérieur de l'échantillon.

Finalement, l'analyse des observations réalisées grâce à tous ces dispositifs supplémentaires nous laisse supposer que les mêmes effets peuvent être rencontrés au cours des mesures de la perméabilité avec les perméamètres longitudinal et radial.



**Figure 2-13.** Résultats des observations : a) mouvement descendant du piston plongeur, b) mouvement ascendant du piston plongeur.

## **II.3.2. Mesures de la perméabilité avec le perméamètre longitudinal**

Les mesures de la perméabilité des mousses avec le perméamètre longitudinal furent réalisées avec deux types de liquide : l'eau et l'huile ISO VG 46. Les techniques de mesure pour ces deux liquides ne sont pas identiques et ont certaines particularités, à cause des différences significatives entre les propriétés physiques de l'eau et de l'huile.

Ci-après, les méthodes de mesures ainsi que les descriptions des dispositifs expérimentaux et les résultats obtenus sont présentés.

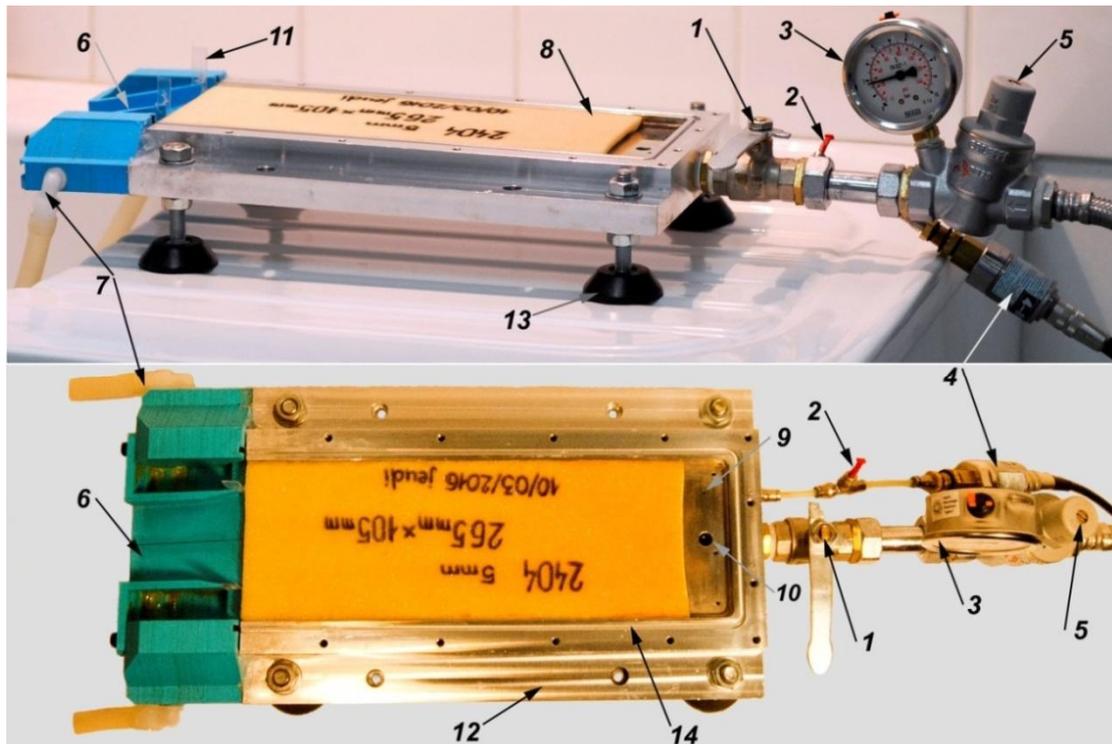
### **II.3.2.1. Mesures de la perméabilité à l'eau avec le perméamètre longitudinal**

Le perméamètre longitudinal conçu au sein de notre laboratoire est présenté sur la Figure 2-14. La conception de ce dispositif expérimental fut réalisée en coopération avec nos collègues de l'Université Polytechnique de Bucarest Traian Cicone et Petrica Turtoi. Ce dispositif expérimental consiste en un bâti en aluminium comprenant un canal de section rectangulaire usiné dans sa partie supérieure. Quatre pieds réglables sont prévus pour assurer la position horizontale du perméamètre.

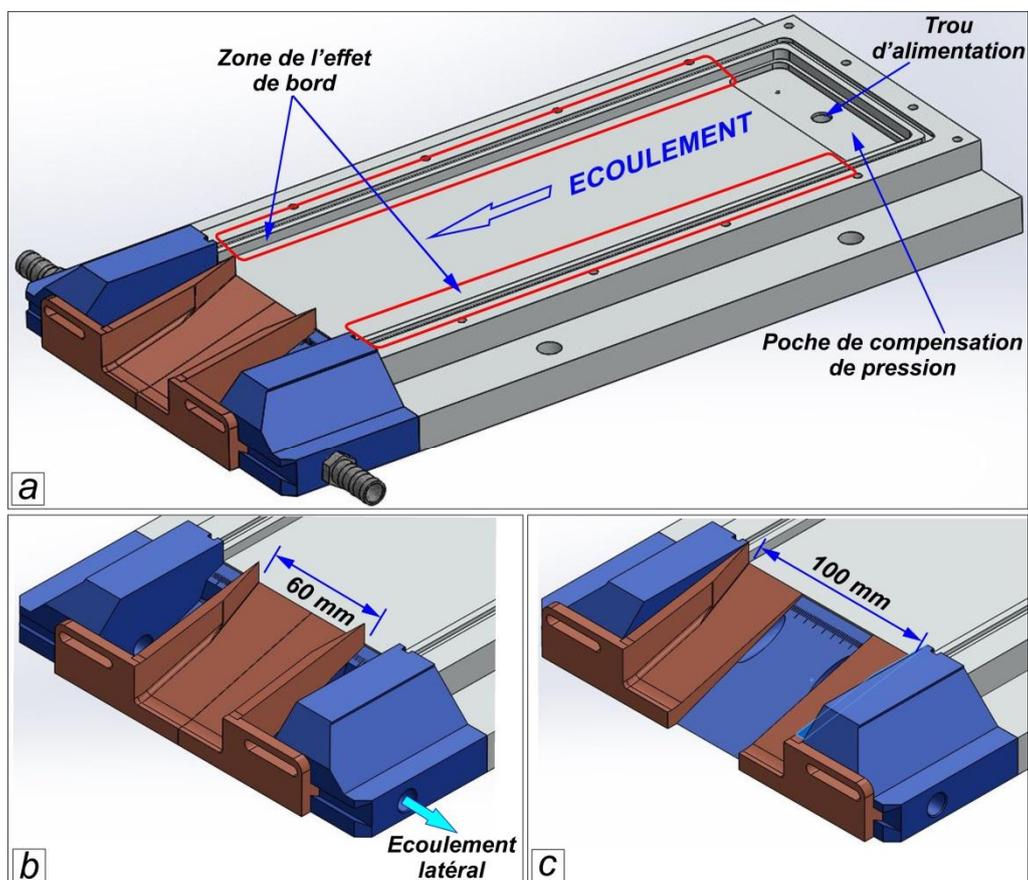
Afin d'alimenter le perméamètre en continu, celui-ci est relié au réseau d'eau du bâtiment. La variation de la pression est effectuée grâce à un régulateur de pression situé au niveau du tuyau d'amenée d'eau. Pour contrôler la variation de pression, le dispositif est instrumenté d'un manomètre et un capteur de pression connecté vers un ordinateur. Un purgeur est installé devant le capteur de pression et permet de purger l'air de tous les conduits afin d'éviter toute perturbation des mesures due à la présence d'air. Une poche de compensation de pression est usinée au niveau du trou d'alimentation et permet d'obtenir un champ de pression uniforme devant l'échantillon de mousse étudié.

Le perméamètre permet de réaliser des essais pour différents taux de compression de la mousse. Cette possibilité est réalisée grâce à un assortiment de plaques supérieures d'épaisseurs différentes. De plus, un assortiment supplémentaire de plaques en plexiglass donne la possibilité de visualiser l'écoulement à travers l'échantillon étudié. L'étanchéité du perméamètre assemblé est assurée par un joint torique inséré dans une gorge rectangulaire usinée au niveau du bord.

L'évacuation de l'eau se produit via un écarteur réglable qui permet d'avoir une largeur variable du conduit d'évacuation (60 – 100 mm) et donc de déterminer séparément les débits de l'écoulement principal et de l'écoulement latéral (Figure 2-15). Un joint torique entre le bâti et l'écarteur réglable assure l'assemblage étanche entre les pièces. En outre, pour éviter le mélange entre l'écoulement principal et latéral au niveau de la plaque supérieure, chaque partie mobile de l'écarteur est équipée d'un déflecteur supplémentaire. L'étanchéité supplémentaire entre différentes composantes du perméamètre est faite avec du silicone ou de la graisse.



**Figure 2-14.** Perméamètre longitudinal (vue sans plaque supérieure) [1 – robinet, 2 – purgeur, 3 – manomètre, 4 – capteur de pression, 5 – régulateur de pression, 6 – écarteur réglable, 7 – évacuation latérale, 8 – mousse, 9 – accepteur de pression, 10 – trou d’alimentation, 11 – déflecteur supplémentaire, 12 – bâti, 13 – pieds réglables, 14 – gorge rectangulaire].

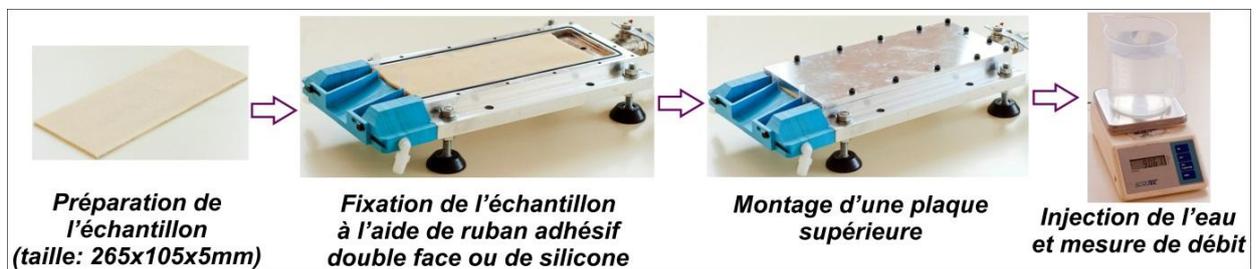


**Figure 2-15.** Perméamètre longitudinal : a) zone de l’effet de bord, b) écarteur réglable : largeur 60 mm, c) écarteur réglable : largeur 100mm.

La procédure de préparation du perméamètre pour une campagne d'essais comprend quelques étapes principales (Figure 2-16) : le découpage et la fixation de l'échantillon à l'intérieur du perméamètre et ensuite l'assemblage final du perméamètre.

Ci-dessous, on décrit d'une manière détaillée chaque étape ainsi que les difficultés rencontrées au cours de cette partie de nos recherches.

La première étape est la fixation de la mousse à l'intérieur du perméamètre. Dès les premiers essais préliminaires, nous remarquâmes que la mousse, écrasée par la plaque supérieure, avait tendance à sortir à l'extérieur lorsque la pression augmentait. Une autre solution alors fut testée : de petites aiguilles-crampons furent insérés dans une plaque supérieure en plexiglass. Il s'est avéré que cette solution n'était viable que pour une pression inférieure 0,6 bars. En effet, lors de l'augmentation de la pression, nous constatâmes l'arrachement de morceaux de mousse au niveau des aiguilles-crampons, induisant le déchirement de l'échantillon et, finalement, le glissement de ce dernier en dehors de perméamètre (Figure 2-17a).



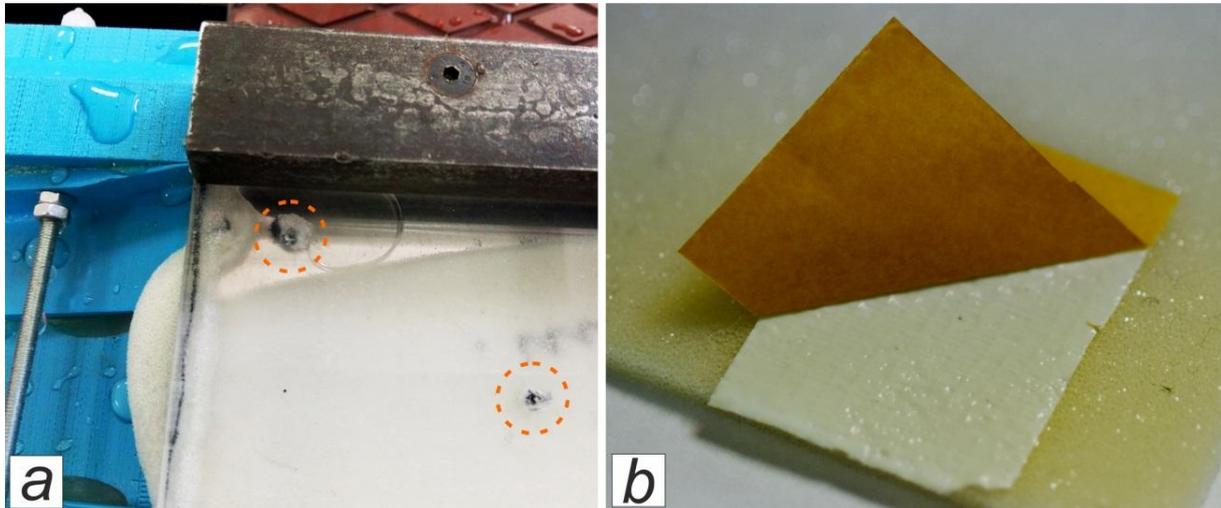
**Figure 2-16.** Préparation de perméamètre longitudinal.

Le moyen optimal de fixation fut trouvé parmi les matériaux adhésifs : la mousse fut fixée avec un ruban adhésif double face renforcé par de la fibre de verre à haute résistance (Figure 2-17b). Ce ruban présente un adhésif de type permanent qui résiste bien au contact avec eau. La fixation avec le ruban adhésif est effectuée sur toute la surface entre le dessous de l'échantillon et le bâti. Pourtant, il faut préciser que le ruban adhésif a une épaisseur moyenne d'environ 0,22 mm et donc il modifie légèrement le taux de compression de l'échantillon étudié. Dans le calcul suivant de la perméabilité, cette valeur est déduite pour avoir le taux de compression réel de la mousse.

Le choix de la taille de l'échantillon et le réglage de l'écarteur sont deux autres points importants survenus au cours de la préparation du perméamètre. C'est ainsi que, grâce aux essais de vérification, l'influence importante de l'effet de bord sur le débit à travers l'échantillon fut identifiée (Figure 2-15a). Afin de limiter cette influence, les contre-mesures suivantes furent appliquées :

- ❖ Premièrement, nous fîmes une analyse de la taille de l'échantillon optimale. À priori, cette taille devait correspondre à la taille du logement prévu au sein du bâti (265 x 100 mm). Mais durant des essais nous nous aperçûmes qu'un échantillon légèrement plus large (265 x 105 mm) permettait de créer une couche tassée au niveau des bords et donc de diminuer l'influence de l'effet de bord.

- ❖ Deuxièmement, l'influence du réglage de la largeur de l'écarteur réglable sur les mesures fut étudiée. Pour cela, des tests de vérification furent effectués pour trois réglages de l'écarteur (100 mm, 80 mm et 60 mm). Après analyse des résultats, le réglage à 60 mm fut retenu comme celui permettant de récupérer une quantité suffisante d'eau du centre de l'écoulement affecté au minimum par l'effet de bord.



**Figure 2-17.** Fixation de l'échantillon à l'intérieur du perméamètre : a) à l'aide d'aiguilles-crampons [les cercles orange indiquent la position des aiguilles-crampons], b) avec le ruban double face renforcé par la fibre de verre à haute résistance.

Une fois le perméamètre assemblé et préparé, la procédure de mesure décrite ci-dessous est appliquée.

Avant de commencer les essais pour chaque taux de compression de la mousse, on laisse couler l'eau (à une pression de 1 bar) pendant 30 minutes à travers l'échantillon fixé dans le perméamètre. Cette étape est nécessaire pour bien chasser l'air de l'intérieur de la mousse. Les essais pour chaque taux de compression sont réalisés pour des valeurs de pression suivantes : 0,7 bar, 1 bar, 1,2 bar, 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar et 3 bar. Pour avoir un écoulement stable après chaque changement de pression, un temps de stabilisation de pression de 10 minutes est respecté.

Comme nous l'avons précisé avant, des plaques en aluminium d'épaisseurs différentes permettent de comprimer la mousse de 3,5 mm jusqu'à 1,5 mm avec un pas de 0,5 mm. Après chaque changement de plaque, les étapes citées ci-dessus se répètent.

Chaque campagne d'essais comprend deux séries de mesures consécutives et une série supplémentaire pour vérifier l'influence probable du vieillissement de la mousse étudiée. À son tour, chaque série de mesures inclut sept mesures du débit pour chaque pression d'alimentation. Il faut noter que la quantité d'eau qui traverse l'échantillon est mesurée pendant un intervalle de temps préétabli, tandis que le débit et donc la perméabilité sont le résultat de calcul. L'explication de ces calculs ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux sont présentées plus loin dans le paragraphe II.3.2.3.

### **II.3.2.2. Mesures de la perméabilité à l'huile avec le perméamètre longitudinal**

Le principe de mesure de la perméabilité à l'huile est le même que celui à l'eau. On cherche toujours à déterminer le débit à travers un échantillon pour des gradients de pression et des taux de compression divers afin de calculer des valeurs de perméabilité. Cependant, du fait que l'on utilise l'huile en tant que fluide d'alimentation, la procédure de mesure comporte des particularités importantes.

Pour réaliser ce type de mesures, l'huile minérale ISO VG 46 fut utilisée. Une centrale hydraulique permet d'alimenter le perméamètre en huile en continu. La pression et la température d'alimentation de l'huile sont pilotées via le poste de commande de la centrale hydraulique. En complément, deux thermocouples sont insérés directement aux extrémités longitudinales de l'échantillon pour contrôler la température à l'entrée et à la sortie de la zone de filtration.

Les premiers tests de vérification du fonctionnement du perméamètre alimenté en huile permirent de découvrir un problème de fixation de l'échantillon à l'intérieur du perméamètre. L'interaction chimique entre l'huile et la couche adhérente du ruban double face provoque le décollement de la mousse et par suite, à l'échappement de cette dernière en dehors du perméamètre. En effet, au niveau du contact entre la mousse et le ruban, l'huile dissout la couche adhérente supérieure du ruban. Afin de pallier ce problème, la fixation de la mousse est effectuée avec le silicone acétoxy translucide LOCTITE SI 5366 qui résiste au contact avec l'huile. L'application du silicone est faite de manière uniforme sur toute la surface du bâti afin que l'épaisseur moyenne de la couche adhésive soit d'environ 0,2 mm. Comme dans le cas de la fixation avec le ruban double face, cette valeur est déduite de l'épaisseur de la mousse, afin d'avoir le taux de compression réel.

Initialement, il était prévu d'alimenter le perméamètre avec l'huile à une température de 40°C. Mais durant les premiers essais, à cause du faible débit à travers la mousse comprimée, la centrale hydraulique ne pouvait pas maintenir correctement cette température, dû à ses particularités constructives, notamment au niveau de la régulation PID (i.e. au niveau d'un régulateur qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure).

En même temps, à cause du faible débit, une forte variation de la température fut observée entre l'entrée et la sortie du perméamètre, pouvant aller jusqu'à 10°C. En effet, la longueur de passage étant relativement grande par rapport à l'épaisseur de l'échantillon, le débit est faible et l'huile traversant l'échantillon échange facilement des calories avec le bâti qui est lui-même en convection avec l'air ambiant. Il est évident que la variation de la température change les propriétés physiques de l'huile. En particulier, la Figure 2-18 montre la variation de la viscosité dynamique de l'huile en fonction de la température. On voit qu'un faible changement de température peut provoquer une variation significative de viscosité. Pour uniformiser le champ de température et donc diminuer l'influence thermique sur les résultats des mesures, le perméamètre fut équipé d'une isolation thermique et une autre centrale hydraulique avec une température d'alimentation de 20°C fut utilisée. Toutes ces précautions permirent d'obtenir une variation de température entre l'entrée et la sortie du

perméamètre ne dépassant pas 2°C pour chaque mesure. Cette légère variation de la température est bien entendu prise en compte dans les calculs suivants de la perméabilité à l'huile.

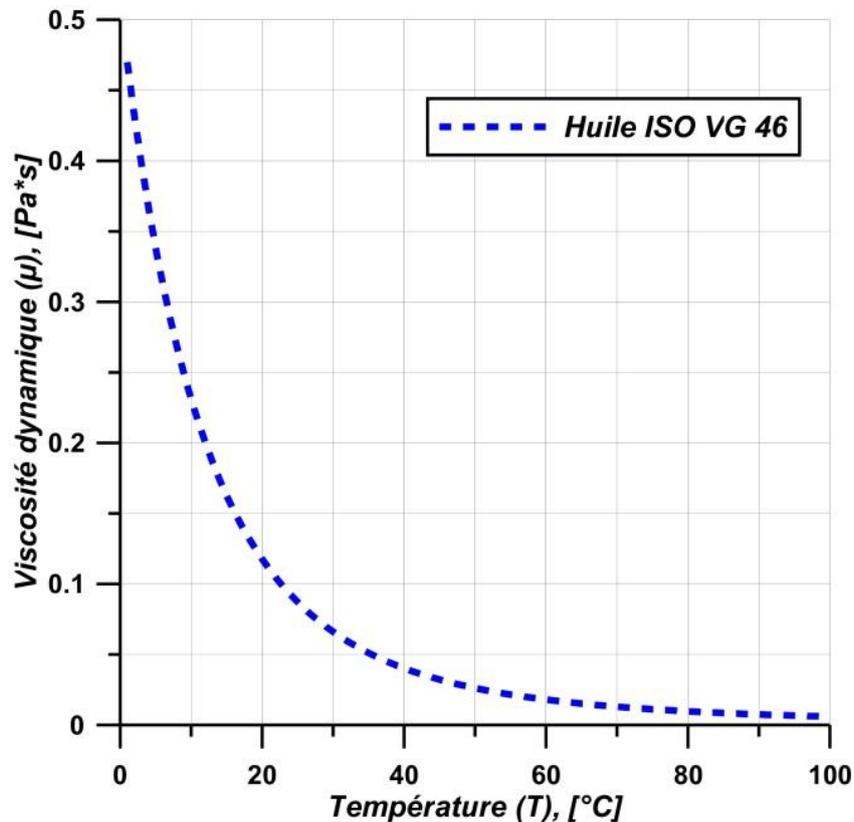


Figure 2-18. Variation de la viscosité de l'huile ISO VG 46 en fonction de la température.

Les premières mesures permirent de découvrir non seulement des problèmes de fixation de la mousse et l'apparition d'un gradient de température, mais aussi un effet électrostatique complètement inattendu.

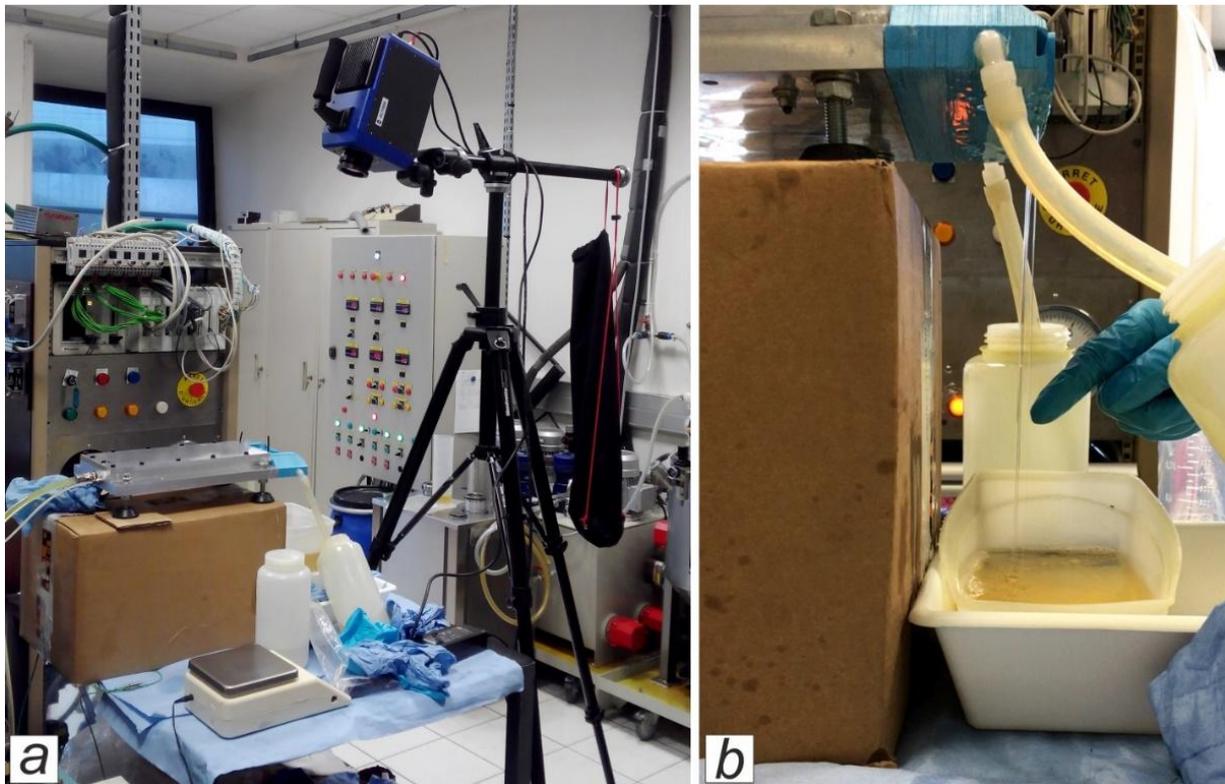
En effet, par un pur hasard, nous pûmes remarquer que le fluide sortant du perméamètre semblait être électrostatiquement chargé. En effet, nous constatâmes que l'huile récupérée après le passage à travers le milieu poreux dans un béccher avait tendance à s'échapper de ce dernier via le bec tourné vers une boîte en carton.

Un effet similaire fut observé en approchant un doigt de bec du béccher (Figure 2-19a). Également, nous constatâmes un mouvement ascendant de l'huile dans le béccher en verre provoqué par une vis, positionnée près de l'interface de phases huile-gaz (Figure 2-19b).

L'explication de cet effet se trouve dans autre branche de la physique, appelée l'électrostatique, qui étudie les phénomènes créés par des charges électriques statiques. Actuellement, la charge électrostatique des circuits hydrauliques devient un problème fréquent, car les fluides à faible conductivité (l'huile, en particulier) sont de plus en plus utilisés. Ces fluides sont parmi les plus susceptibles d'accumuler et de générer de grandes tensions [64]. Il est évident que ces accumulations de charge élevée sont dangereuses car elles peuvent endommager les composants du système, ce qui peut éventuellement provoquer sa défaillance.



**Figure 2-19.** Effet électrostatique : a) l'huile attirée par un doigt, b) mouvement ascendant de l'huile dans un bécher en verre attirée par une vis.



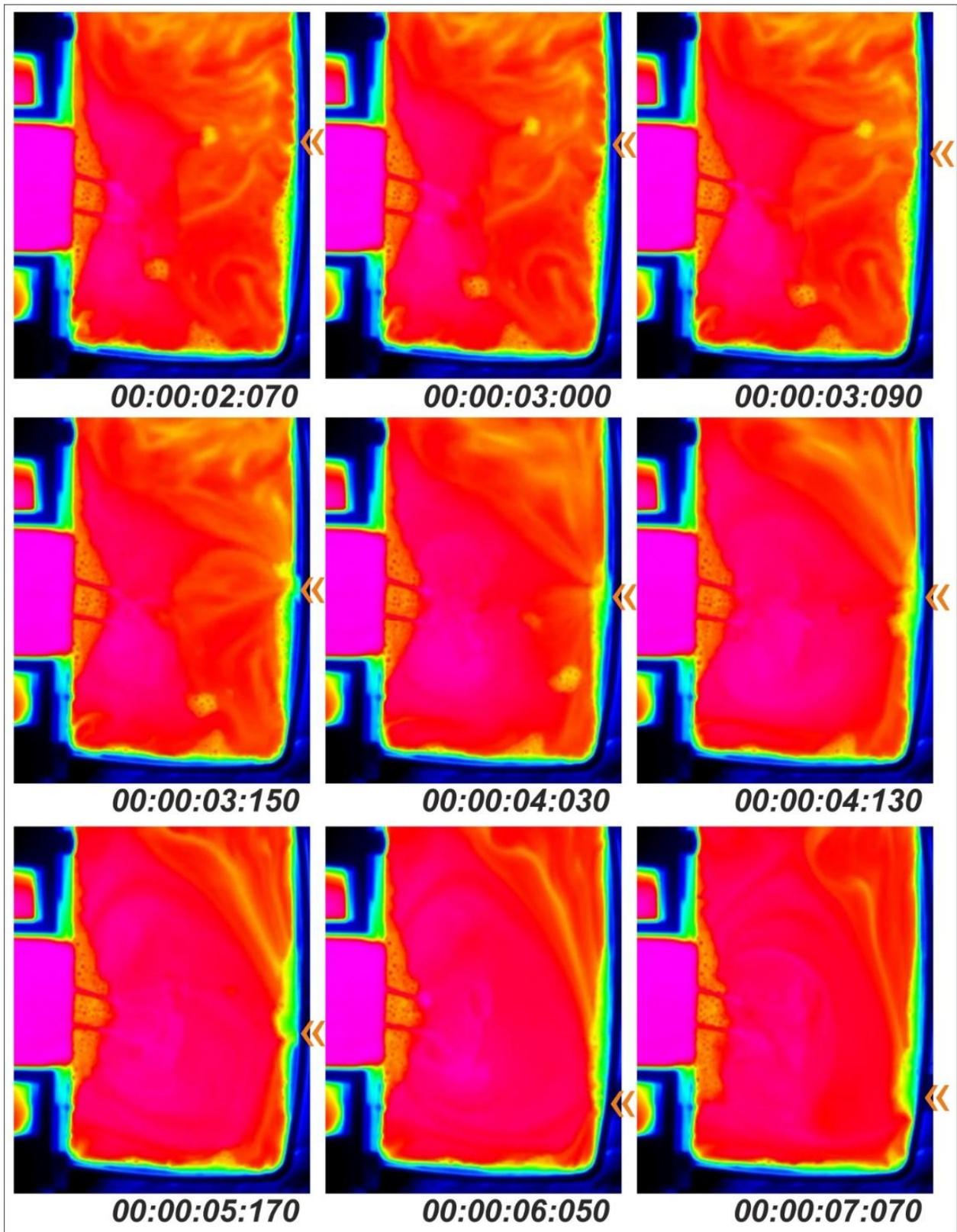
**Figure 2-20.** Observation de l'écoulement de l'huile avec une caméra infrarouge FLIR SC7000 : a) vue générale, b) écoulement de l'huile dans le réservoir.

Dans le cas du perméamètre, suite au passage à travers le milieu poreux, l'huile accumule une charge électrostatique engendrée par le frottement entre la structure de la mousse comprimée et l'huile. Il est bien connu que les charges de même signe se repoussent, tandis que celles de signes opposées s'attirent. Par conséquent, on peut supposer que l'huile récupérée dans le bécher a une certaine charge statique, tandis que le doigt (et la vis cités

avant) a une charge opposée. Dès qu'on approche ces objets vers l'huile récupérée, on remarque qu'ils commencent à attirer l'huile avec une force d'interaction électrique.

Pour mieux comprendre l'effet électrostatique et visualiser l'écoulement de l'huile après son passage dans le perméamètre, une autre observation fut réalisée avec une caméra infrarouge FLIR SC 7000 installée au-dessus du dispositif expérimental (Figure 2-20). L'huile chaude passant à travers le milieu poreux est récupérée dans un réservoir de stockage (Figure 2-21). En rapprochant un doigt de la paroi extérieure du réservoir, on remarque qu'il provoque l'écoulement de l'huile de la zone d'entrée vers la paroi. De plus, l'huile chargée électrostatiquement suit le doigt lorsqu'on le déplace le long de la paroi.

En parlant à propos de la procédure de mesure de la perméabilité à l'huile, on précise qu'elle est presque similaire à celle utilisée pour les mesures à l'eau. Les mêmes temps sont prévus pour chasser l'air de l'échantillon (30 minutes) et pour stabiliser la pression d'alimentation (10 minutes). Les mesures furent faites pour les compressions de la mousse de 3,5 mm jusqu'à 1,5 mm avec le pas 0,5 mm, et la pression d'alimentation de 0,7 jusqu'à 3,5 bar. Compte tenu du temps très important d'une mesure, une série d'essais avec trois mesures du débit pour chaque pression d'alimentation fut seulement réalisée. Ensuite le calcul de la perméabilité fut fait en prenant en compte la variation de la température et donc la viscosité au cours des mesures. Les résultats de ces calculs ainsi que les données expérimentales et la comparaison avec des résultats de modélisation d'écoulement à l'intérieur du perméamètre seront discutés dans le chapitre suivant.



**Figure 2-21.** Écoulement de l'huile dans un réservoir observé avec une caméra infrarouge FLIR SC7000 [le symbole ‘<<’ orange représente la position d'un doigt derrière la paroi du réservoir].

### **II.3.2.3. Résultats expérimentaux des mesures de perméabilité avec le perméamètre longitudinal. Comparaison avec des résultats de modélisation**

Ce chapitre présente le bilan des mesures de la perméabilité à l'eau et à l'huile réalisées avec le perméamètre longitudinal ainsi qu'une analyse et une comparaison avec des résultats de modélisation de l'écoulement à l'intérieur du perméamètre.

Nous décrivons d'abord quelques particularités du comportement de la mousse en polyuréthane remarquées durant les mesures de la perméabilité.

Deux campagnes de mesure de la perméabilité à l'eau furent réalisées avec un intervalle d'environ un an (la première au mois de février 2016 et la deuxième en avril 2017) et une campagne à l'huile ISO VG 46 (en avril 2017). L'idée essentielle de cette deuxième campagne était de vérifier encore une fois la perméabilité de la mousse à l'eau avant de commencer les mesures à l'huile ISO VG 46 et, en complément, de vérifier l'influence probable du vieillissement de la mousse sur les mesures. Pour cette raison, nous utilisâmes la mousse de la même livraison, respectant la même procédure de mesure. Malgré cela, une variation significative de la perméabilité fut remarquée entre la première et la deuxième campagne (les valeurs sont présentées ci-après). De plus, nous remarquâmes que certaines zones de la mousse qui était stockée dans un carton avaient changé de couleur (apparition des zones de couleur jaunâtre-orange). Nous précisons ici que les mousses étaient stockées dans un carton emballé dans un film en cellophane, ne garantissant pas un stockage hermétique. Ainsi, certaines parties de la mousse eurent un contact direct avec l'air ambiant, provoquant les changements de coloris mentionnés précédemment.

En s'appuyant sur le travail de recherche de Pellizzi [65] on peut supposer que la mousse subit un vieillissement durant cette année de stockage. Le changement de la couleur de la mousse fut probablement provoqué par la variation de l'humidité et de la température dans la salle de stockage. Comme indiqué dans le travail de Pellizzi, le vieillissement de la mousse ne s'exprime pas seulement par les changements de l'apparence de la mousse, mais aussi par la variation des propriétés chimiques et physiques de la structure de mousse.

Une autre particularité importante observée pendant les mesures de la perméabilité concerne l'épaisseur de la mousse avant et après les mesures. Ainsi, l'épaisseur initiale de l'échantillon (5 mm) fut réduite après la campagne d'essais, ne reprenant pas son épaisseur initiale (l'épaisseur de la mousse usée est mesurée à 4,6 mm). En même temps, nous remarquâmes au toucher que la structure de la mousse était devenue plus molle par rapport à la mousse neuve. Toutes ces observations nous laissent supposer encore une fois que la structure et les propriétés de la mousse peuvent subir certaines variations au niveau chimique et physique à la fois durant le stockage ainsi qu'au cours des essais.

Les résultats expérimentaux bruts présentent la variation du débit ( $Q$ ) à travers la mousse comprimée en fonction de la pression d'alimentation ( $\Delta P$ ) (Figure 2-22). Nous rappelons ici que la mousse utilisée dans les essais a une épaisseur initiale de 5 mm et est comprimée grâce à l'utilisation des plaques en aluminium d'épaisseur différentes. On peut remarquer que pour le même gradient de pression et la même épaisseur de la mousse, le débit de l'huile est plus faible que le débit d'eau. Cette variation est totalement attendue, car les

viscosités de ces deux liquides ont une différence significative ( $\mu_{H_2O}=0,001$  Pa·s et  $\mu_{ISO VG 46}=0,117$  Pa·s à 20°C).

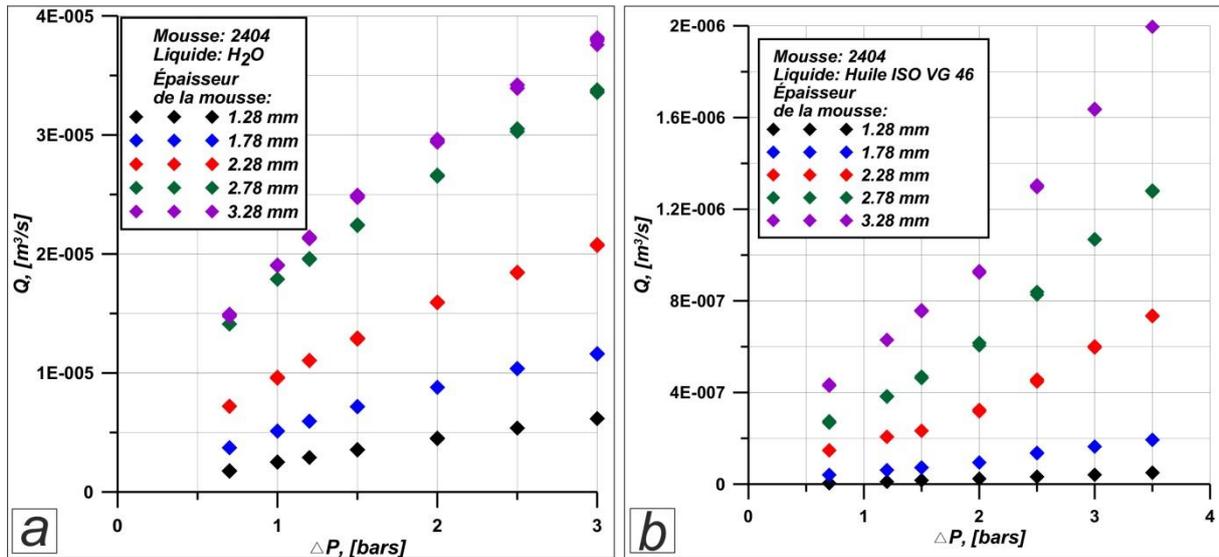


Figure 2-22. Résultats bruts des mesures de la perméabilité : a) à l'eau, b) à l'huile ISO VG 46.

## Perméabilité à l'eau

Afin d'interpréter les résultats expérimentaux et donc de déterminer la perméabilité de la mousse, il faut avoir un modèle qui permette de décrire l'écoulement à travers le milieu poreux. Pour cela nous allons utiliser des modèles d'écoulement qui furent présentés auparavant dans la partie bibliographique.

En conséquence, une première tentative d'évaluation de la perméabilité de la mousse fut faite avec le modèle de Darcy :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta P}{L} = -\frac{\mu}{\phi} u, \quad (2.5)$$

où  $L$  est une longueur de l'échantillon. Dans ce cas, la vitesse du fluide fut déterminée comme :

$$u = \frac{Q}{A_e} = \frac{Q}{b \cdot h}, \quad (2.6)$$

avec  $A_e$  la surface de section de l'échantillon étudié,  $b$  et  $h$  respectivement la largeur et l'épaisseur (hauteur) de l'échantillon. Dans l'équation (2.5)  $\Delta P$  et  $L$  sont des variables mesurées,  $u$  est une variable calculée,  $\mu$  est déterminée par les propriétés de l'eau et donc  $\phi$  est la seule inconnue à déterminer.

En appliquant le modèle de Darcy, la viscosité et la masse volumique de l'eau sont considérées comme constantes. Afin d'obtenir la perméabilité, l'équation d'une droite de régression pour chaque épaisseur de mousse est calculée par la méthode des moindres carrés. Par la suite, la perméabilité calculée grâce à cette méthode sera appelée la perméabilité de Darcy.

Cependant, il faut noter que le modèle de Darcy n'est valable que lorsque la vitesse de l'écoulement est constante suivant l'épaisseur du film (ou plus exactement suivant l'épaisseur de la mousse imbibée comprimée). Il est applicable pour un écoulement plan, en particulier lorsque le flux latéral n'est pas pris en compte. Néanmoins, l'application de conditions limites de non-glissement entre la couche poreuse et les parois inférieure et supérieure peut provoquer la variation de la vitesse suivant l'épaisseur de la mousse. En effet, la vitesse atteint des valeurs nulles dans les zones proches de la paroi. Afin de tenir compte de cette variation de la vitesse qui ne peut pas être prédite par le modèle de Darcy, il est nécessaire d'utiliser un modèle plus précis.

Par conséquent, la perméabilité fut également estimée en utilisant le modèle de Darcy-Brinkman :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{\phi} u + \mu' \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (2.7)$$

Dans cette équation, la viscosité effective est calculée comme le rapport entre la viscosité dynamique et la porosité :

$$\mu' = \frac{\mu}{\varepsilon}. \quad (2.8)$$

En intégrant l'équation (2.7), l'expression de la vitesse du fluide en fonction de l'épaisseur de la couche poreuse peut être décrite comme :

$$u(y) = C_1 \sinh(\omega y) + C_2 \cosh(\omega y) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2.9)$$

avec  $C_1$  et  $C_2$  les constantes d'intégration et le coefficient  $\omega = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\phi}}$ .

En appliquant les conditions limites de non-glissement au niveau des parois  $u(y=0) = u(y=h) = 0$ , l'équation (2.9) prend la forme suivante :

$$u(y) = \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \sinh(\omega y) + \cosh(\omega y) - 1 \right). \quad (2.10)$$

Après intégration de cette dernière équation, nous pouvons obtenir le débit volumique du fluide à travers l'échantillon de mousse étudié :

$$Q(\phi) = b \int_0^h u(y) dy = -b \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( h - 2 \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right). \quad (2.11)$$

On précise ici que, comme pour le modèle de Darcy, la variation du débit de fluide fut considérée comme linéaire suivant la longueur de l'échantillon. Une courbe des moindres carrés ajustée à la vitesse de l'écoulement en fonction du gradient de pression fut ainsi utilisée pour déterminer la perméabilité de Darcy-Brinkman.

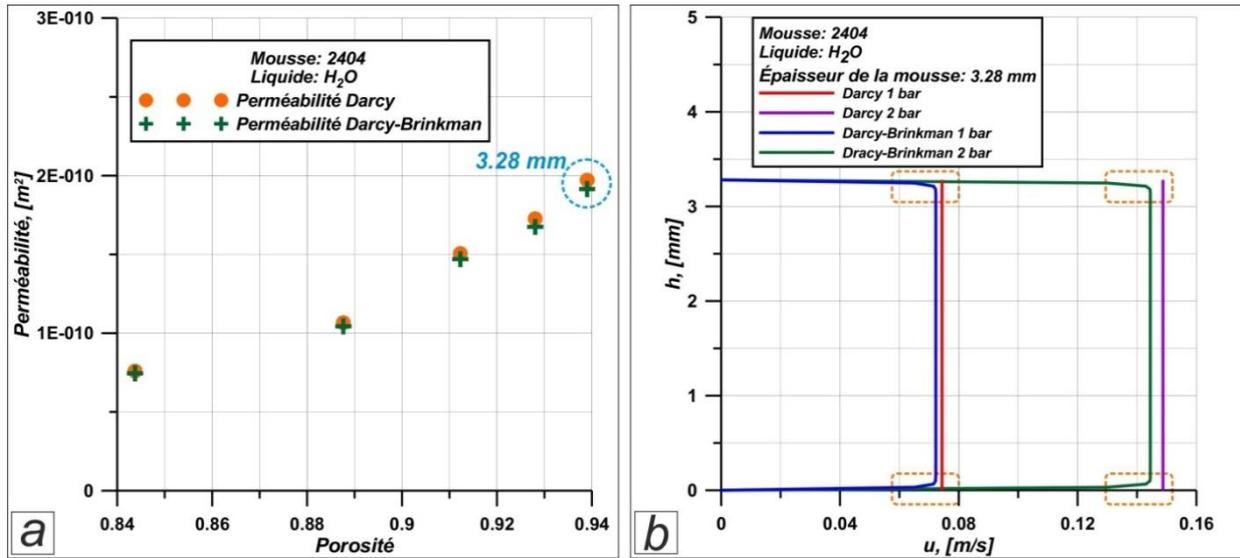


Figure 2-23. Résultats des modélisations pour les modèles de Darcy et Darcy-Brinkman : a) variation de la perméabilité en fonction de la porosité, b) profil des vitesses pour la porosité  $\varepsilon=0,939$  ( $h=3,28$  mm).

En faisant la comparaison entre les résultats de modélisation réalisée avec ces deux modèles (Figure 2-23a), on peut constater que les différences entre les valeurs de la perméabilité sont très faibles. Cela nous mène à la conclusion que le modèle de Darcy-Brinkman n'apporte pas de modifications importantes dans l'estimation de la perméabilité de la mousse par rapport au modèle de Darcy. L'influence de l'extension de Brinkman est illustrée sur la Figure 2-23b qui montre la variation de la vitesse du fluide suivant l'épaisseur de l'échantillon étudié. Ici nous ne présentons que les résultats pour l'épaisseur de la mousse comprimée de 3,28 mm ( $\varepsilon=0,939$ ). Pour d'autre cas les tendances sont les mêmes. Comme on peut le voir sur ce graphe, les différences entre les deux modèles se limitent à une couche fine près des limites entre les parois et le milieu poreux où le modèle de Darcy-Brinkman tient compte des conditions limites sans glissement (zones entourées de pointillés oranges).

Cependant, comme nous l'avons mentionné auparavant, pour les épaisseurs importantes de la mousse (i.e. la porosité plus importante), l'allure de la variation du débit a tendance à s'écarter d'une ligne droite (Figure 2-22a). Pour cette raison, une analyse complémentaire des effets d'inertie sur la perméabilité de la mousse fut réalisée via l'introduction dans le modèle de Darcy d'un terme dit «de Forchheimer», qui représente les forces de traînée. La loi d'écoulement du fluide à l'intérieur du milieu poreux prend ainsi la forme suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta P}{L} = -\frac{\mu}{\phi} u + \frac{c_f \rho}{\sqrt{\phi}} u^2 . \quad (2.12)$$

Dans ce cas, la variation du gradient de pression avec la vitesse du fluide est parabolique. La méthode proposée par Boomsma et Poulikakos [66] fut utilisée pour déterminer la perméabilité de Darcy-Forchheimer. En introduisant les coefficients  $A_{DF} = \frac{\mu}{\phi}$  et  $B_{DF} = \frac{c_f \rho}{\sqrt{\phi}}$ , l'équation (2.12) peut être représentée par la relation ci-dessous :

$$\frac{\Delta P}{L} = -A_{DF} u + B_{DF} u^2 . \quad (2.13)$$

Les coefficients  $A_{DF}$  et  $B_{DF}$  sont déterminés par la méthode des moindres carrés de la manière suivante :

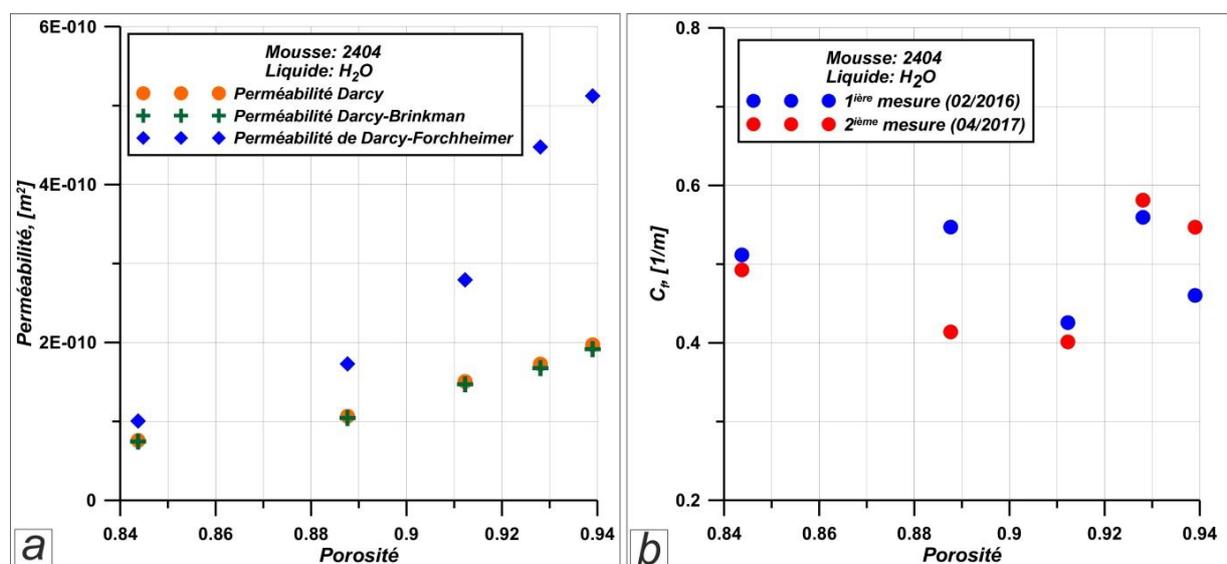
$$A_{DF} = \frac{(\frac{1}{L}\sum_{i=1}^n u_i \Delta P_i)(\sum_{i=1}^n u_i^4) - (\frac{1}{L}\sum_{i=1}^n u_i^2 \Delta P_i)(\sum_{i=1}^n u_i^3)}{(\sum_{i=1}^n u_i^2)(\sum_{i=1}^n u_i^4) - (\sum_{i=1}^n u_i^3)(\sum_{i=1}^n u_i^3)} \quad (2.14)$$

$$B_{DF} = \frac{(\frac{1}{L}\sum_{i=1}^n u_i^2 \Delta P_i)(\sum_{i=1}^n u_i^2) - (\frac{1}{L}\sum_{i=1}^n u_i \Delta P_i)(\sum_{i=1}^n u_i^3)}{(\sum_{i=1}^n u_i^2)(\sum_{i=1}^n u_i^4) - (\sum_{i=1}^n u_i^3)(\sum_{i=1}^n u_i^3)} \quad (2.15)$$

Les valeurs calculées des coefficients nous permettent ensuite d'obtenir à la fois le coefficient de Forchheimer et la perméabilité de Darcy-Forchheimer.

La comparaison entre les perméabilités prédites avec les trois différents modèles est présentée Figure 2-24a. On peut remarquer que plus la porosité est importante, plus la différence entre les valeurs calculées augmente. En même temps, on remarque que le coefficient de Forchheimer ( $C_f$ ) n'est pas un coefficient constant, mais qu'il varie en fonction de la porosité (donc en fonction du taux de compression) de la mousse (Figure 2-24b).

En analysant les résultats de la modélisation et les données expérimentales pour cinq épaisseurs de mousse comprimée (Figure 2-25), nous pouvons conclure que le modèle de Darcy-Forchheimer montre une meilleure corrélation avec les expériences que les modèles de Darcy ou Darcy-Brinkman.



**Figure 2-24.** Résultats des modélisations : a) perméabilités déterminées par les trois modèles [calculées à partir des résultats de la première campagne de mesure], b) variation du coefficient de Forchheimer en fonction de la porosité [calculée à partir des données expérimentales des deux campagnes de mesure].

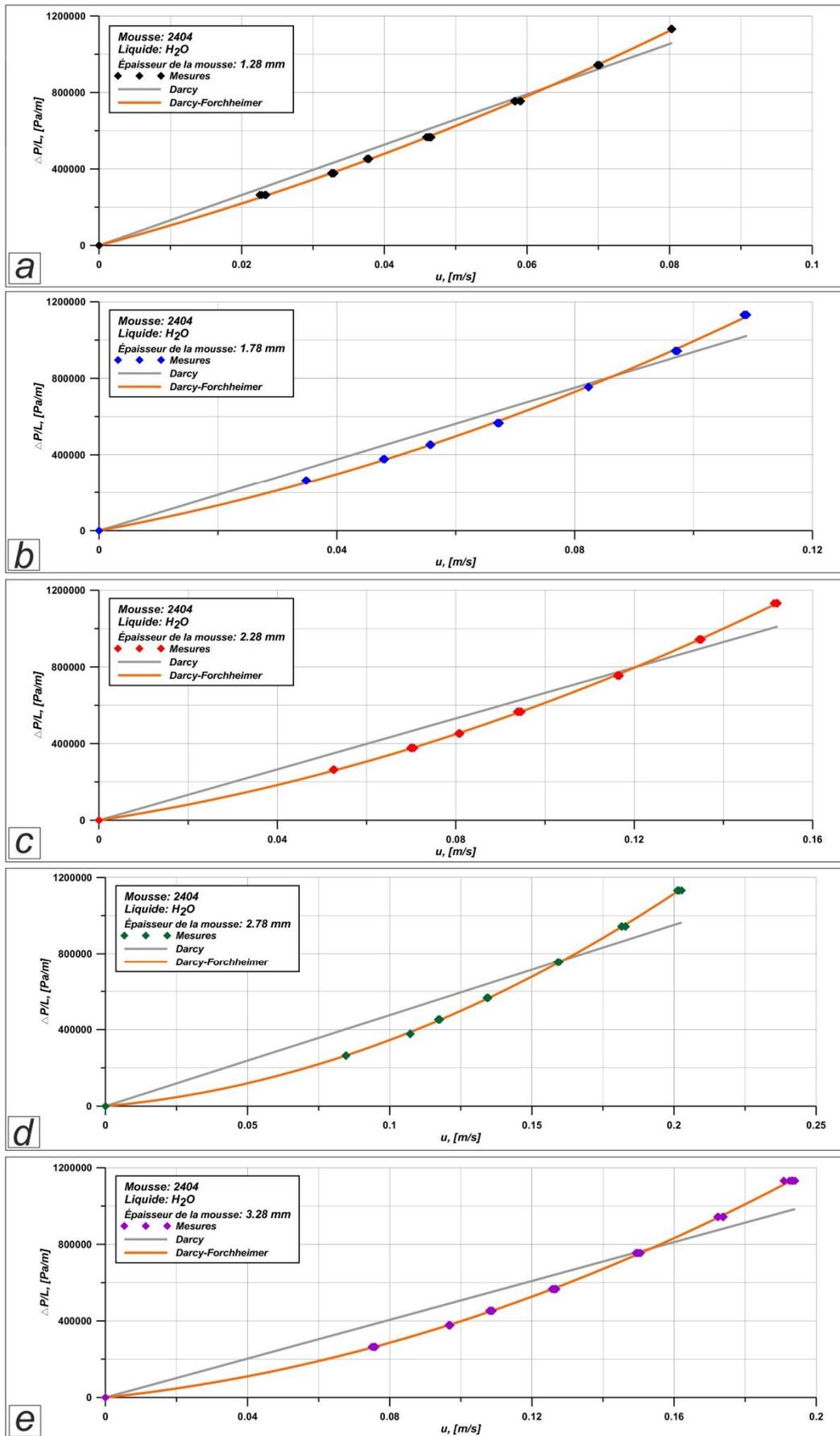


Figure 2-25. Interprétation des résultats des mesures de la perméabilité de mousse 2404 à l'eau pour différentes épaisseurs : a) 1,28 mm, b) 1,78 mm, c) 2,28 mm, d) 2,78 mm, e) 3,28 mm.

## Perméabilité à l'huile ISO VG 46

Dès la première analyse des résultats bruts des mesures de la perméabilité à l'huile ISO VG 46 nous pûmes remarquer que la variation du débit d'huile avec le gradient de pression était linéaire (Figure 2-22b). Par conséquent, pour décrire l'écoulement de l'huile à travers le milieu poreux nous utilisons simplement la loi de Darcy donné par la relation (2.5).

Dans cette équation, la viscosité dynamique ne peut pas être considérée constante pour toutes les mesures, comme c'était le cas pour les mesures de la perméabilité à l'eau. En effet, si on considère la température sur la totalité d'une campagne de mesures, une variation maximale 4°C a pu être observée. Ainsi, durant une campagne des mesures, la viscosité ne peut être considérée comme constante. En utilisant l'approximation analytique de Reynolds pour la variation de la viscosité avec la température, l'équation (2.5) prend la forme suivante :

$$\frac{\Delta P}{L} = - \frac{\mu_0 e^{-(\beta \Delta T)}}{\phi} u , \quad (2.16)$$

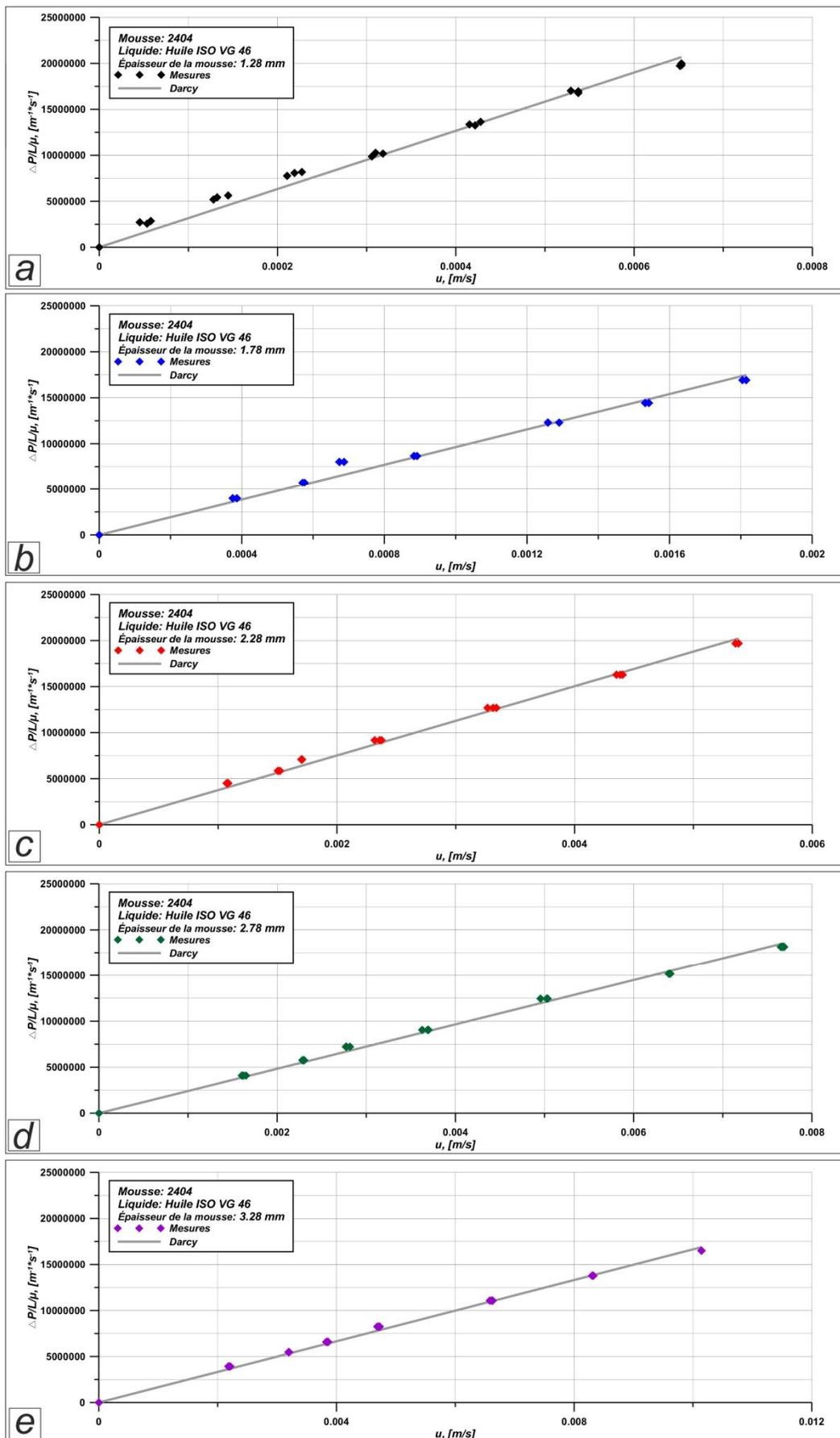
avec  $\beta$  le coefficient de thermoviscosité et  $\mu_0$  la viscosité dynamique à  $T_0$ .

Néanmoins, sachant que la température ne varie que très légèrement entre l'entrée et la sortie du perméamètre pendant une mesure (1-1,5°C), on négligera la variation de viscosité au cours de l'essai pour chaque mesure. Autrement dit, la viscosité est considérée constante pour chaque mesure, mais varie d'une mesure à l'autre durant la campagne de mesures. Donc, en prenant en compte cette hypothèse, l'équation (2.16) peut être modifiée de la manière suivante :

$$\frac{1}{\mu} \frac{\Delta P}{L} = - \frac{1}{\phi} u . \quad (2.17)$$

Par la suite, en appliquant une méthode des moindres carrés nous pouvons déterminer les coefficients de régression et donc la perméabilité de Darcy à l'huile ISO VG 46.

Une comparaison des résultats de modélisation et des mesures expérimentales de la perméabilité à l'huile pour cinq épaisseurs de mousse comprimée est présentée Figure 2-26. En analysant ces graphes nous pouvons faire la conclusion que le modèle de Darcy est capable de prédire correctement les résultats expérimentaux pour l'huile ISO VG 46. De plus, on remarque que la précision du modèle augmente avec l'augmentation de la porosité du matériau poreux.



**Figure 2-26.** Interprétation des résultats des mesures de la perméabilité de mousse 2404 à l'huile ISO VG 46 pour différentes épaisseurs : a) 1,28 mm, b) 1,78 mm, c) 2,28 mm, d) 2,78 mm, e) 3,28 mm.

En s'appuyant sur les résultats expérimentaux présentés sur la Figure 2-27, nous pouvons constater la différence entre la perméabilité mesurée à l'eau et la perméabilité mesurée à l'huile ISO VG 46 pour différentes porosités de la mousse étudiée.

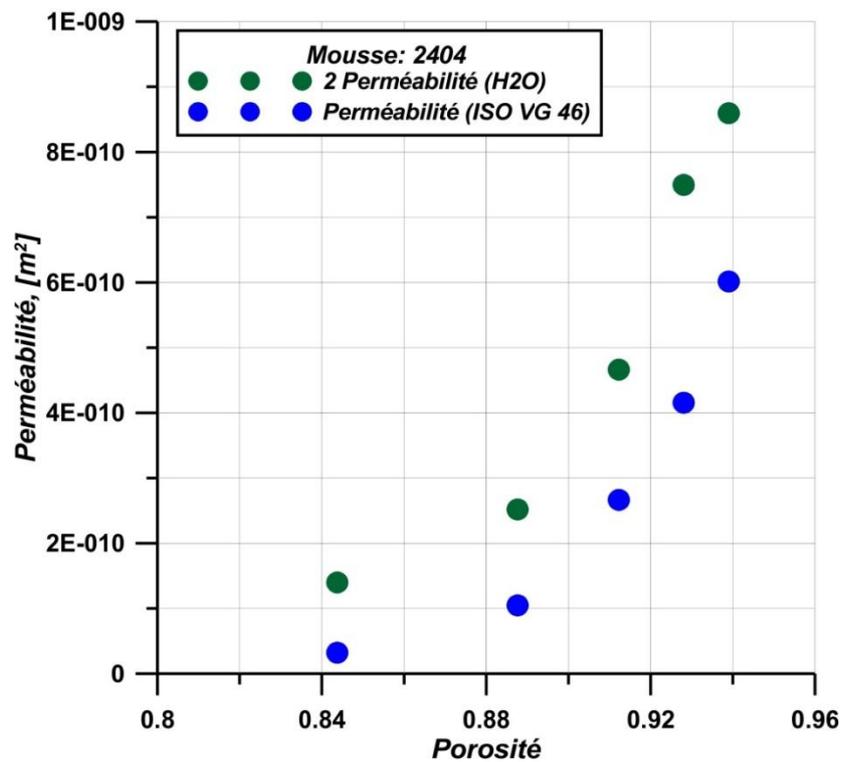


Figure 2-27. Comparaison des perméabilités à l'eau et à l'huile.

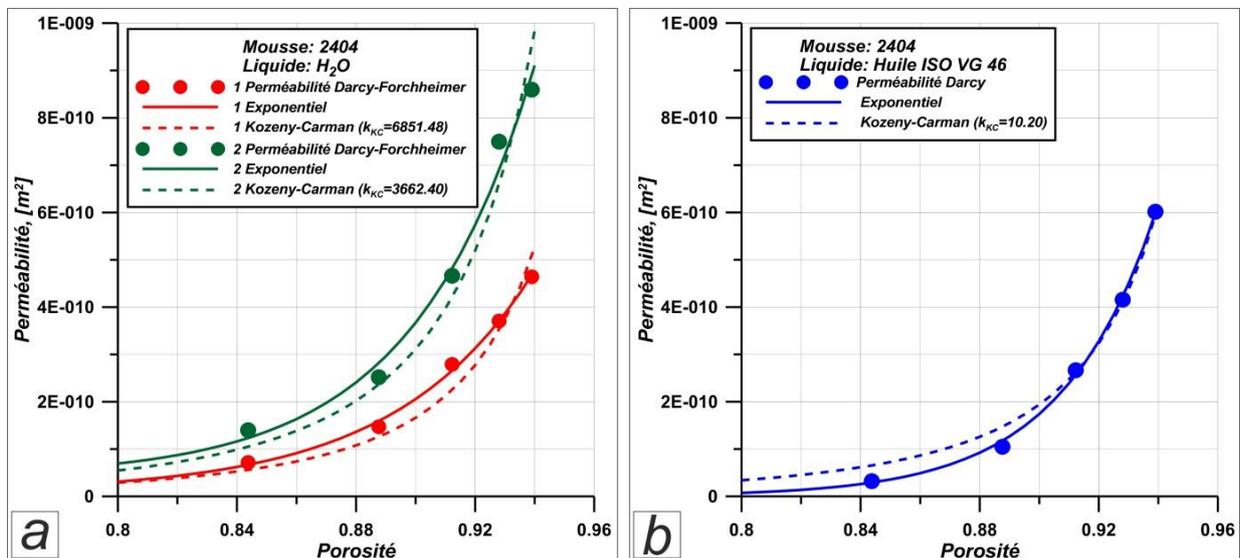
### Corrélation entre la porosité et la perméabilité

Du point de vue d'une application pratique, il nous parut intéressant d'essayer de déterminer une relation analytique entre la porosité et la perméabilité de la mousse étudiée. Pour cela, l'équation de Kozeny-Carman (avec des modifications proposées par Ghaddar) nous sembla tout à fait adaptée. Il s'agit de la même que celle déjà mentionnée dans la partie bibliographique :

$$\phi_{KC} = \frac{d_f^2 \varepsilon^3}{16k_{KC}(1-\varepsilon)^2} \quad (2.19)$$

Dans l'équation initiale, le paramètre  $d_f$  correspondait à un diamètre constant des fibres qui formaient le milieu poreux tandis que dans notre cas, il correspond au diamètre moyen des pores que nous considérâmes égal à 0,667 mm. En utilisant la méthode des moindres carrés, les coefficients et la perméabilité de Kozeny-Carman furent calculés pour l'eau et l'huile. En complément, la corrélation entre la perméabilité et la porosité fut estimée à l'aide d'une loi exponentielle. Il est important de préciser ici que les valeurs de perméabilité furent approximées grâce à deux lois différentes qui ajustaient bien les résultats expérimentaux : la perméabilité de Darcy-Forchheimer pour l'eau et la perméabilité de Darcy pour l'huile ISO VG 46. Les résultats des calculs pour les deux liquides sont présentés Figure 2-28.

En particulier, la Figure 2-28a présente les courbes de corrélation pour les perméabilités à l'eau déterminées à partir des résultats expérimentaux des première et deuxième campagnes d'essai. En analysant ces graphes, nous pouvons remarquer que la loi de Kozeny-Carman et la loi exponentielle prédisent avec la même précision les valeurs expérimentales.



**Figure 2-28.** Corrélation entre la perméabilité et la porosité de la mousse 2404 [ $\varepsilon_{0,2404} = 0,96$ ] : a) pour les mesures à l'eau, b) pour les mesures à l'huile ISO VG 46.

Les résultats des calculs pour la perméabilité à l'huile sont présentés sur la Figure 2-28b. En faisant l'analyse des courbes de tendance, nous pouvons constater que la loi exponentielle assure la meilleure corrélation avec des valeurs de la perméabilité à l'égard de la loi de Kozeny-Carman. Cependant nous pouvons noter que pour une porosité supérieure à 0,91, les deux modèles sont capables de prédire correctement la perméabilité de la mousse mesurée à l'huile ISO VG 46.

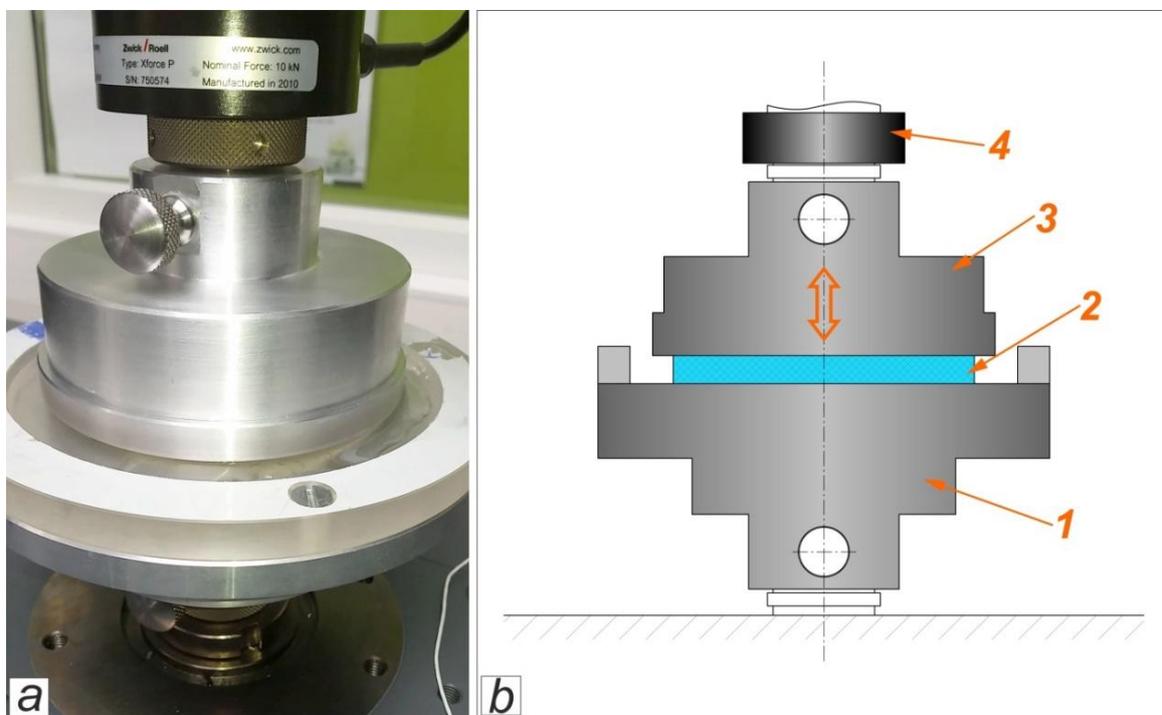
Nous pouvons donc conclure que la loi exponentielle est celle qui approxime le mieux les points expérimentaux.

## II.4. Caractéristiques mécaniques de la mousse de polyuréthane

Ce chapitre termine l'étude de la caractérisation des matériaux poreux réalisée dans le cadre de nos travaux de recherches. Il est notamment concentré sur le comportement en compression de la mousse de polyuréthane. Cette étude consiste à comprimer uniaxialement un échantillon de mousse de la même taille que celui qui est utilisé sur le banc d'essais XPHD (i.e. un diamètre de 80 mm et une épaisseur de 5 mm). L'étude expérimentale de la mousse en compression fut réalisée à l'aide d'une machine d'essais mécaniques ZwickRoell Z010 qui fut spécialement adaptée pour ces tests (Figure 2-29). L'adaptation de la machine d'essais mécaniques fut également réalisée en collaboration avec notre collègue de l'Université

Polytechnique de Bucarest, le Professeur Traian CICONI. Le plateau-réservoir 1 en aluminium équipé d'un bord en plexiglass est fixé sur le bâti de la machine d'essais. Il permet de positionner correctement l'échantillon ainsi que, dans le cas de l'échantillon imbibé, de récupérer le liquide. Le plateau de compression 3 via un capteur de force 4 est fixé sur la traverse mobile qui est entraînée par deux vis latérales, actionnées par un motoréducteur à courant continu.

Concernant la procédure des mesures, on précise ici qu'elle s'appuie sur la norme ISO 3386-1 :1986 [67], qui spécifie une méthode de détermination de la caractéristique de contrainte-déformation relative en compression des matériaux polymères alvéolaires à basse masse volumique, jusqu'à  $250 \text{ kg/m}^3$ . D'après cette norme, l'échantillon de mousse inséré entre deux surfaces plates doit être comprimé trois fois consécutives jusqu'à 40 % de son épaisseur initiale ; la quatrième compression quant à elle présente un essai de référence suivant lequel on détermine le comportement de la mousse en compression.



**Figure 2-29.** Essais de compression de la mousse : a) photographie de l'adaptation de machine d'essais mécaniques ZwickRoell Z010, b) schéma de l'adaptation [1 – plateau-réservoir, 2 – mousse sèche ou imbibée, 3 – plateau de compression, 4 – capteur de force].

Les résultats des essais pour les mousses neuves sèche et imbibée sont présentés sur la Figure 2-30. Les graphes comprennent deux phases : la phase de compression et la phase de décompression de l'échantillon. En analysant ces graphes, on peut constater le phénomène d'hystérésis : l'aire entre deux courbes (compression et décompression) correspond à l'énergie dissipée par la mousse ; en phase de décompression les contraintes sont graduellement affaiblies. En s'appuyant sur le travail de Basu [68] on peut également distinguer trois zones importantes dans les courbes contraintes-déformations qui représentent les régimes suivants : le régime linéaire, le régime plateau et à la fin le régime de densification.

Le premier régime correspond à la partie linéaire de la courbe qui est assimilable au régime élastique. Dans cette zone, la déformation appliquée est complètement réversible.

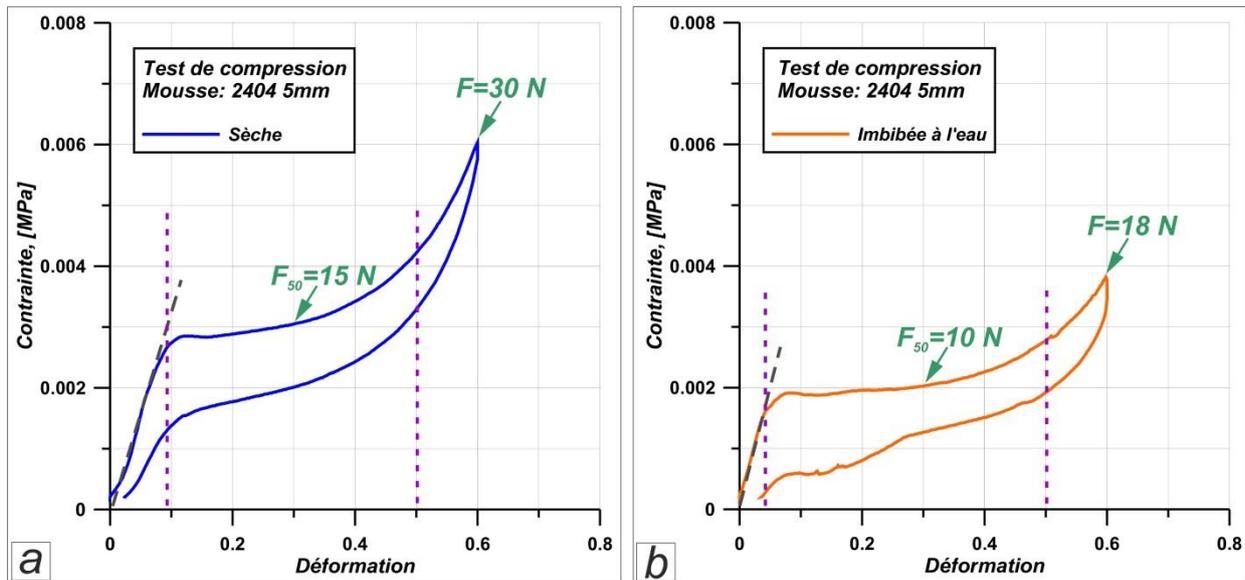


Figure 2-30. Test de compression de la mousse 2404 [réalisé au mois de mai 2015] : a) sèche, b) imbibée à l'eau [les lignes verticales limitent les différents régimes].

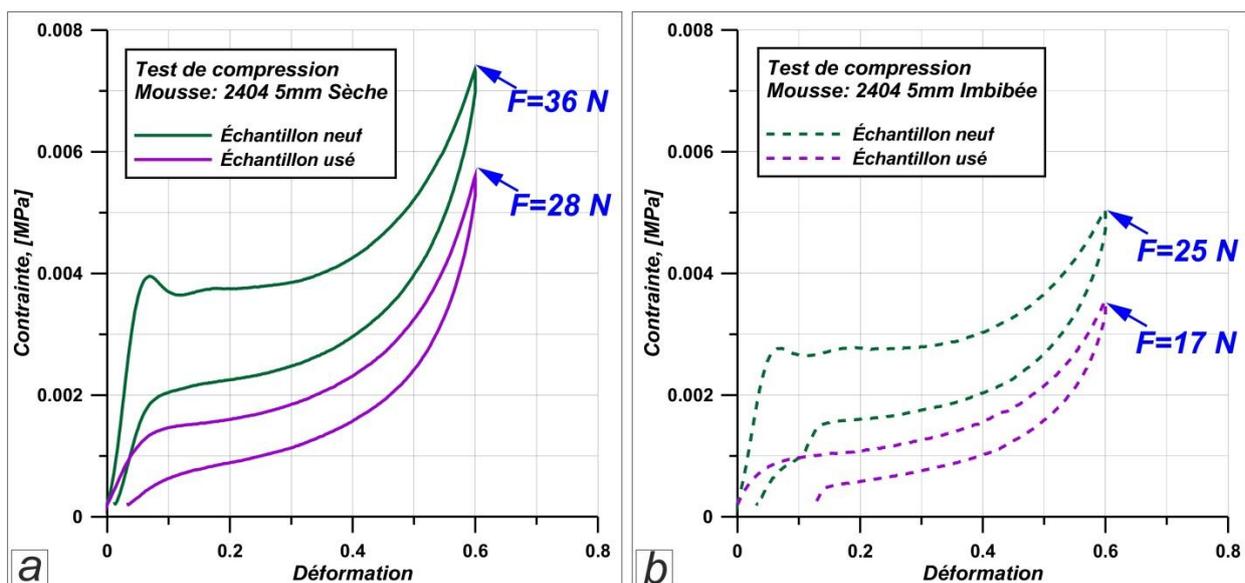


Figure 2-31. Comparaison des résultats des tests de compression de l'échantillon neuf et utilisé [réalisé au mois d'avril 2016] : a) mousse 2404 sèche, b) mousse 2404 imbibée à l'eau.

Le régime suivant correspond à la partie aplatie de la courbe appelé régime plateau. Deux différents phénomènes peuvent être liés à ce régime : le flambage des parois de la structure de la mousse ou la rupture totale ou partielle des parois.

Enfin, le troisième régime, appelé la densification, est caractérisé par l'écrasement des parois qui engendre par conséquent la destruction des cellules.

En continuant l'analyse des graphes présentés Figure 2-30, on constate que le fluide a un impact important sur le comportement de la mousse. En effet, on voit que la présence de

l'eau diminue significativement les contraintes et que le phénomène d'hystérésis est moins marqué.

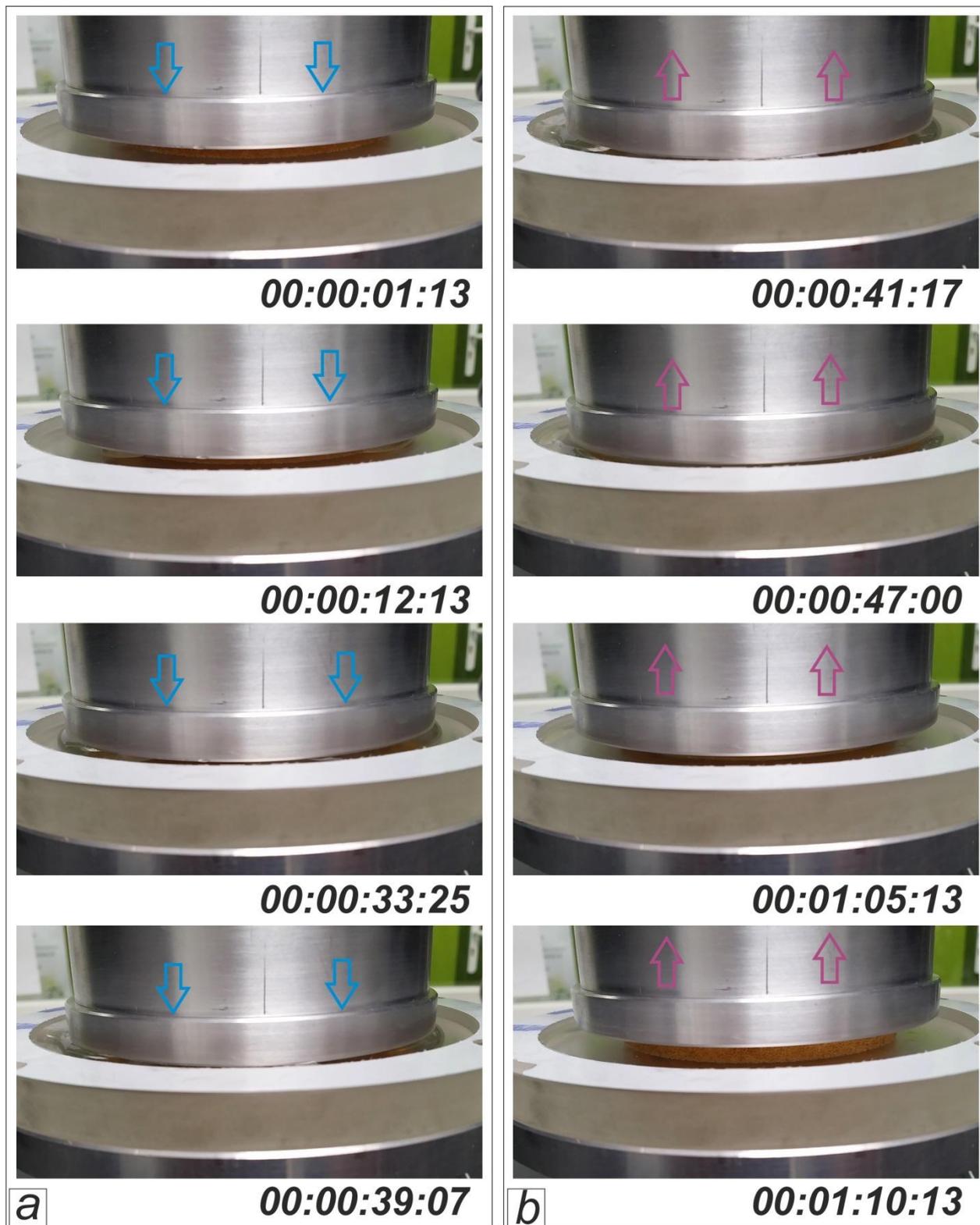
En complément, les essais de compression de la mousse imbibée à l'eau furent accompagnés par une observation visuelle. La Figure 2-32a présente ainsi la compression de la mousse imbibée en une séquence de plusieurs images. Durant la compression, l'eau a tendance à s'échapper à l'extérieur de l'échantillon. Lorsque le plateau supérieur commence à remonter, l'eau revient dans la mousse grâce à l'effet capillaire dû aux forces de tension superficielle entre les différentes phases en présence. À la fin de la décompression, l'eau est complètement réabsorbée par l'échantillon de la mousse étudiée (Figure 2-32b).

Dans le cadre de notre étude, il nous parut intéressant de comparer les caractéristiques mécaniques d'un échantillon neuf à celles d'un échantillon usé. Pour cela, un échantillon de mousse usée fut découpé à partir d'un échantillon rectangulaire utilisé durant une campagne de mesures de la porosité à l'eau avec le perméamètre longitudinal. Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure 2-31.

En analysant le comportement des deux échantillons secs (Figure 2-31a) on remarque que les contraintes mesurées pour l'échantillon neuf sont plus importantes que celles obtenues pour l'échantillon usé. De plus, le phénomène d'hystérésis pour la mousse neuve est plus prononcé que pour la mousse usée. Les mêmes tendances furent observées pour le cas des échantillons imbibés à l'eau (Figure 2-31b). Néanmoins, il faut préciser que la présence du liquide a une influence considérable aussi bien sur la mousse neuve que sur la mousse usée.

Les résultats expérimentaux de ces derniers essais nous laissent donc supposer que la mousse subit des modifications de ses caractéristiques mécaniques suite à l'interaction avec un fluide et suite à des sollicitations mécaniques répétées.

Enfin, ajoutons ici une remarque importante concernant les forces élastiques générées par la structure de la mousse : dans le cadre des hypothèses initiales de la lubrification XPHD ces forces sont considérées comme négligeables par rapport aux forces hydrodynamiques générées à l'intérieur du milieu poreux. Cependant, la validité de cette hypothèse peut être limitée par la capacité de ré-imbibition du milieu poreux dans le cas d'une compression très importante (i.e. le milieu poreux avec des pores partiellement ou complètement écrasés). En outre, la contribution des forces élastiques aux forces ex-poro-hydrodynamiques générées par le système dépend aussi de type du lubrifiant utilisé. Comme nous allons le voir ultérieurement dans le chapitre III.3.3, la pression générée par le système lubrifié avec de l'eau est assez proche des valeurs de contrainte normale engendrées par la structure de la mousse, tandis que pour le cas avec de l'huile ISO VG 46 la composante hydrodynamique augmente d'au moins un ordre de grandeur.



**Figure 2-32.** Test de compression de la mousse 2404 : a) compression [extraction de l'eau de l'échantillon],  
 b) décompression [l'eau est absorbée par la mousse].



# Chapitre III

## Étude expérimentale de la lubrification XPHD et comparaison avec des résultats de modélisation

### III.1. Description du banc d'essais de butées XPHD

Le banc d'essais développé au sein de notre laboratoire est destiné à étudier expérimentalement le fonctionnement de la lubrification XPHD pour les faibles et moyennes vitesses de rotation. Plus précisément, ce dispositif est un prototype expérimental grâce auquel nous essayons de prouver les performances du mécanisme de lubrification XPHD pour une application à une butée. Par la suite, un deuxième banc d'essais «Butées», déjà existant au laboratoire, sera adapté pour les spécifications de la lubrification XPHD et donc permettra de réaliser des essais pour des vitesses de rotation plus importantes.

Une vue générale du banc d'essais est présentée sur les Figures 3-1a et 3-1b. Le banc d'essais XPHD est constitué d'une broche verticale supportée par deux roulements à billes. Un moteur électrique entraîne la broche en rotation de 0 à environ 340 tr/min via une transmission à courroie. La vitesse de rotation est mesurée par un capteur inductif placé au niveau de la poulie menante.

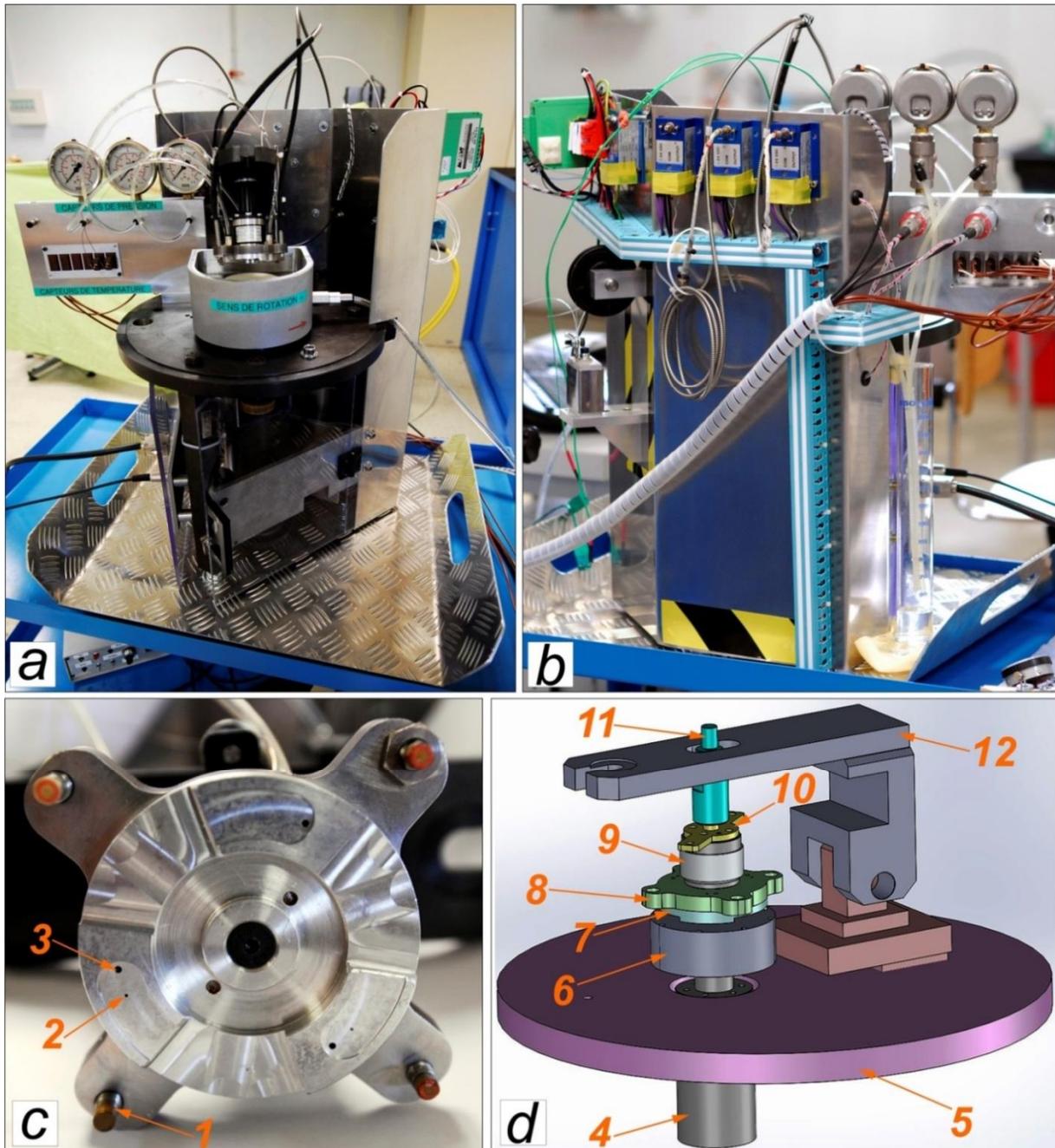
La Figure 3-1d présente une vue schématique de la cellule d'essais. L'échantillon du matériau poreux est fixé sur la surface plane du grain mobile (rotor 6), lui-même installé sur le nez de broche. Le grain fixe (stator 7-8) est relié au bras supérieur 12 via un capteur de couple 9 et diverses pièces intermédiaires, dont une rotule et un axe de guidage 10-11. Pour assurer la coaxialité entre les grains mobile et fixe, un réglage de la position du bras supérieur ainsi qu'un réglage de la position de l'axe sont prévus. En complément, la rotule radiale avec 13° de rotulage est destinée à supporter les mouvements d'oscillation et à compenser les défauts d'alignement.

Le dislocateur est fixé au grain mobile à l'aide d'une vis centrale et deux goupilles d'arrêt. Les orifices percés dans le grain fixe et dans le dislocateur permettent d'instrumenter chaque patin avec un thermocouple et un capteur de pression (Figure 3-1c). L'étanchéité entre le grain et le dislocateur au niveau de la prise de pression est assurée grâce aux trois joints toriques encastrés dans des logements ad hoc. La fixation des trois thermocouples ainsi que l'étanchéité au niveau de la prise de température sont effectuées à l'aide de silicone.

Le grain fixe peut être équipé de quatre capteurs de déplacement inductifs avec une plage de mesure allant jusqu'à 1 mm. Ces capteurs permettent de mesurer l'épaisseur du film (ou plus précisément l'épaisseur de la mousse imbibée et comprimée) par rapport à une cible installée

dans le réservoir. Le réservoir est quant à lui fixé sur l'embase et dispose d'un joint à lèvres qui assure l'étanchéité dynamique au niveau de l'entrée de broche. Un capteur de déplacement à contact est également utilisé pour contrôler le déplacement vertical de l'ensemble «grain fixe – bras supérieur» (Figure 3-2).

Les carters de protection en aluminium et en plexiglass permettent d'assurer la sécurité de manipulation durant les essais. En complément, le carter en aluminium est utilisé pour aménager la partie électrique du banc d'essais (câblages, conditionneurs, raccords) ainsi que pour fixer le capteur de force et les composants supplémentaires (Figure 3-1b).

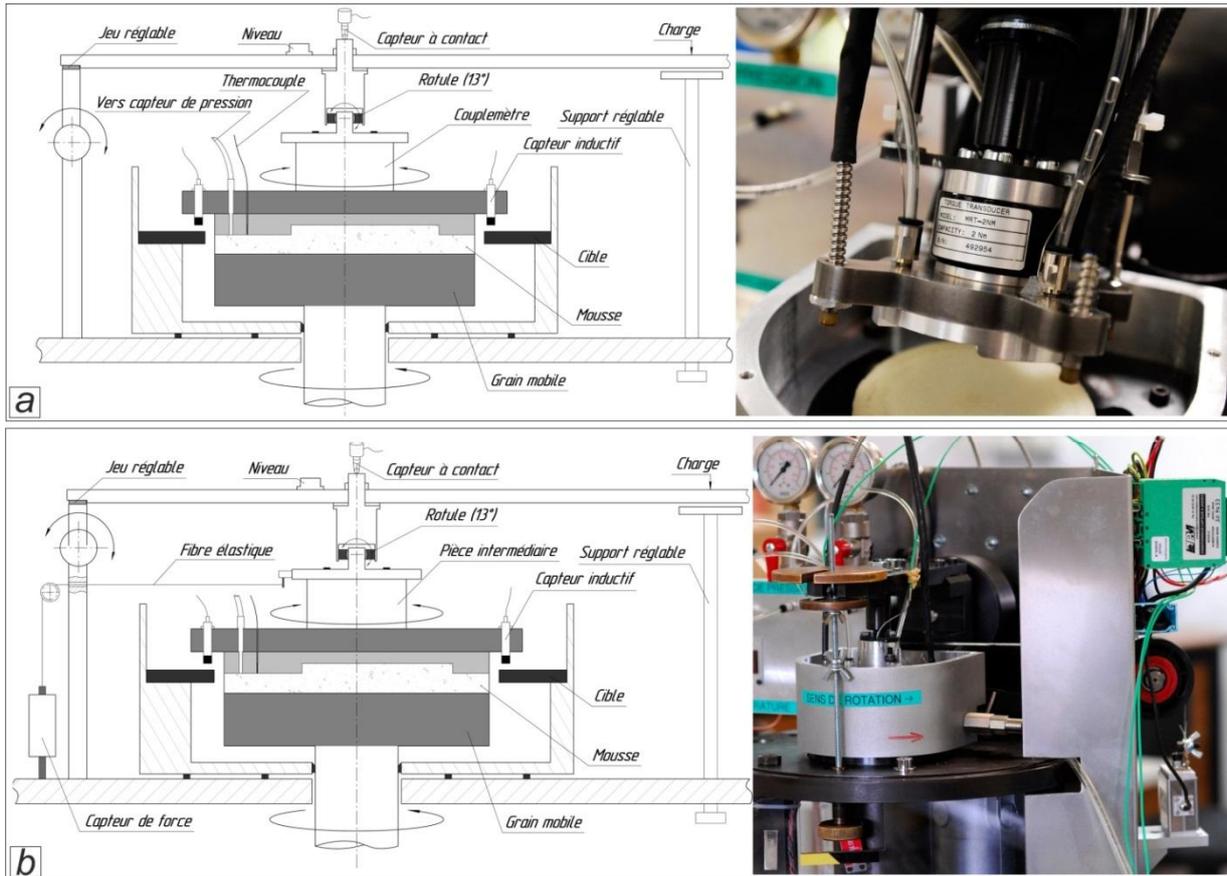


**Figure 3-1.** Banc d'essais XPHD : a) vue de face, b) vue arrière, c) grain fixe, d) schéma de la partie haute (le réservoir est omis) [1 – capteur inductif, 2 – prise de température, 3 – prise de pression, 4 – broche, 5 – embase, 6 – grain mobile, 7 – dislocateur, 8 – grain fixe, 9 – couplemètre, 10 – guidage, 11 – axe, 12 – bras supérieur].

L'acquisition des signaux (vitesse de rotation, températures, pressions, couple et déplacements) et une première analyse des données sont réalisées par le logiciel LabVIEW.

Deux configurations du banc d'essais, présentées Figure 3-2, furent utilisées pour étudier expérimentalement le mécanisme de la lubrification XPHD. La différence essentielle entre ces deux versions du banc consiste dans la méthode de mesure du couple.

Dans la première configuration, le grain fixe est limité en rotation par deux tiges d'arrêt  $\perp$  vissées dans le guidage (Figure 3-3a). Un couplemètre est installé entre le grain fixe et le guidage et permet donc de mesurer directement le couple provoqué par l'interaction de la mousse imbibée avec le dislocateur.



**Figure 3-2.** Deux configurations du banc d'essais XPHD : a) avec couplemètre, b) avec capteur de force.

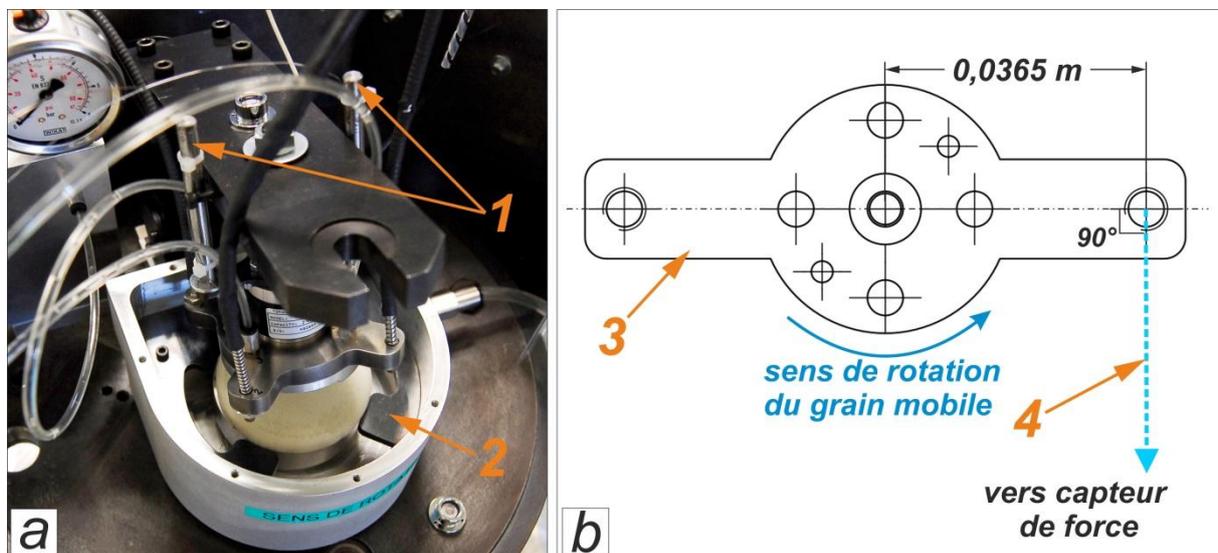
Dans la deuxième configuration, le couplemètre est remplacé par une pièce intermédiaire de la même taille ; le grain fixe dans ce cas est limité en rotation par une fibre élastique qui est accrochée d'un côté vers le guidage et de l'autre côté vers le capteur de force fixé sur le carter de sécurité (Figure 3-2b). La longueur de la fibre élastique est choisie de manière à assurer un angle droit entre l'axe longitudinal du guidage et la fibre (Figure 3-3b). Dans cette configuration, les mesures de couple sont donc indirectes et issues des résultats de calcul à partir de la force mesurée (la force mesurée est multipliée par le bras de levier qui est égal 36,5 mm).

Cette deuxième configuration fut développée afin de remplacer le couplemètre. En effet, nous remarquâmes après quelques campagnes d'essais que son emplacement dans la

zone très proche du liquide provoquait de la condensation à l'intérieur du capteur, perturbant ainsi son fonctionnement correct.

Au total, l'instrumentation du banc d'essais est donc composée des capteurs suivants :

- ❖ un capteur inductif pour mesurer la vitesse de rotation ;
- ❖ trois thermocouples ;
- ❖ trois capteurs de pression (dupliqués par trois manomètres avec les robinets de purges) ;
- ❖ un thermocouple supplémentaire peut être utilisé pour mesurer la température du liquide ;
- ❖ un couplemètre ou un capteur de force pour mesurer le couple ;
- ❖ un capteur à contact ou quatre capteurs inductifs pour mesurer l'épaisseur de la mousse imbibée.



Il faut préciser ici que les capteurs sans contact permettent de faire des mesures précises dans la plage limitée à 1 mm qui peut être diminuée à cause du non-parallélisme entre les grains fixe et mobile. Le capteur à contact a une plage de mesure plus importante (environ 2 mm), le calibrage de ce capteur est plus simple, mais les mesures peuvent être perturbées par le jeu constructif au niveau de la rotule (200  $\mu\text{m}$ ).

Le banc d'essais XPHD fut conçu pour être utilisé selon deux modes opérationnels : géométrie imposée et charge imposée (Figure 3-4). Lors du premier mode opérationnel, la distance entre le support mobile et le dislocateur ( $h_1$ ) est gardée constante. Pour cela, après le réglage de la distance nécessaire, le bras supérieur est fixé sur le support réglable (Figure 3-2) et reste immobile pendant les essais.

En mode «charge imposée» le paramètre  $h_1$  reste variable et dépend seulement de la charge appliquée et de la force ex-poro-hydrodynamique générée par le système. L'application de la charge est effectuée sur le côté libre du bras supérieur qui n'est pas retenu par le support réglable dans cette configuration.

L'étalonnage de la charge appliquée est présenté schématiquement sur la Figure 3-5. Il fut effectué à l'aide d'un ressort ondulé Smalley préalablement caractérisé avec une machine d'essais mécaniques ZwickRoell Z010. Le ressort fut positionné entre les grains fixe et mobile du banc d'essais et le bras supérieur fut progressivement chargé. Le déplacement vertical du bras supérieur provoqué par la compression du ressort fut mesuré avec le capteur à

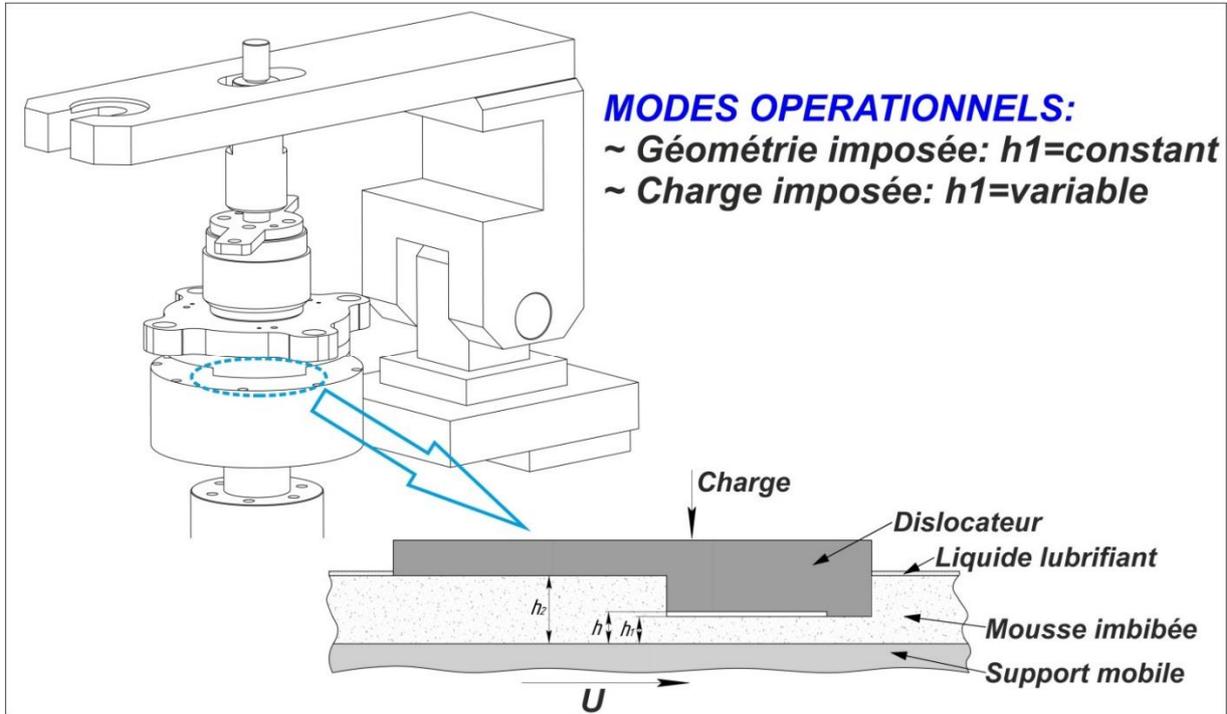


Figure 3-4. Modes opérationnels du banc d'essais XPHD.

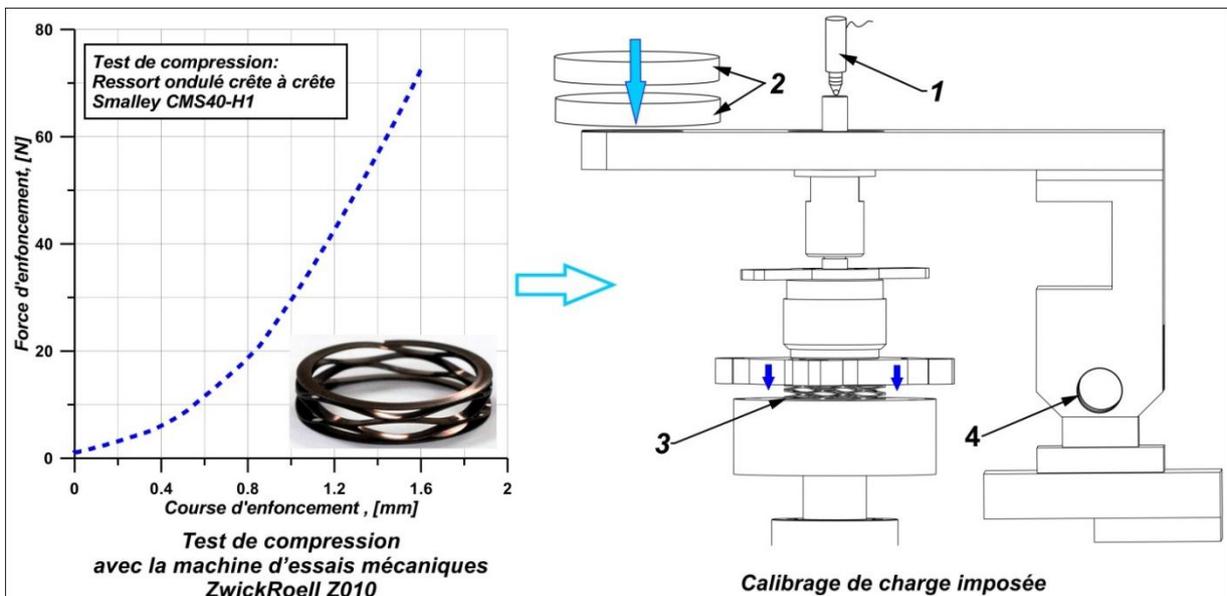
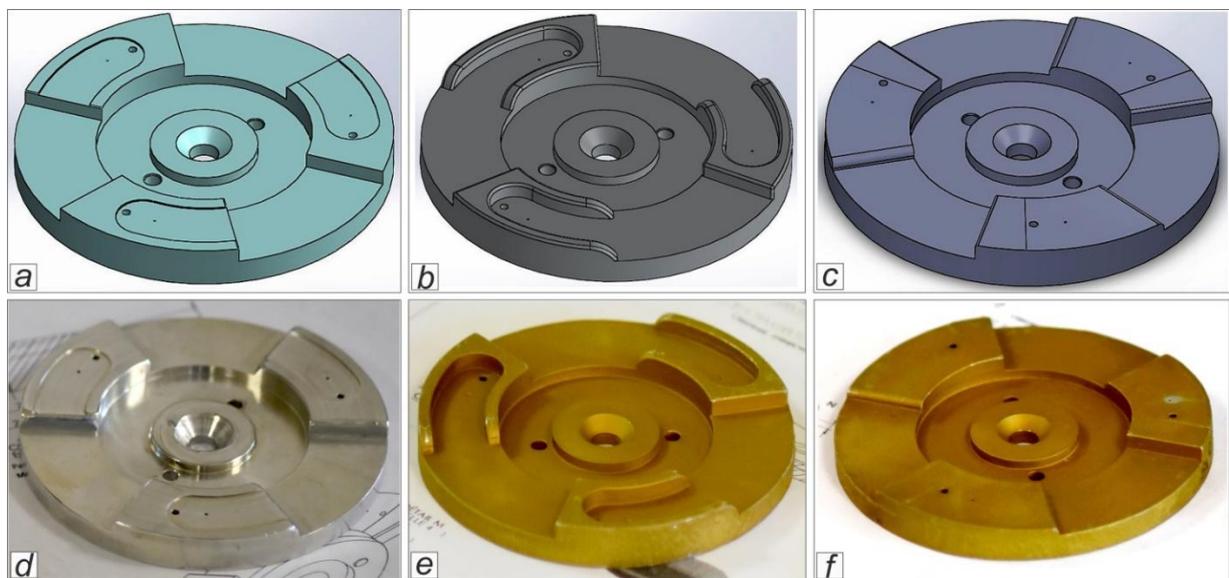


Figure 3-5. Étalonnage de la charge appliquée (mode opérationnel charge imposée) [1 – capteur de déplacement à contact, 2 – poids, 3 – ressort Smalley CMS40-H1, 4 – articulation].

contact. Par la suite, en utilisant la loi de comportement du ressort soumis à une compression, nous pûmes déterminer les valeurs de la charge imposée.

Un élément essentiel du banc d'essais, le dislocateur, entre directement en contact avec la mousse imbibée. Il peut avoir des géométries de patins différentes mais son diamètre extérieur, sa hauteur ainsi que le nombre et la largeur des patins sont les mêmes (les dessins détaillés de chaque dislocateur sont fournis en Annexes 1, 2 et 3).

La phase initiale de l'étude expérimentale fut réalisée avec le dislocateur présenté sur les Figures 3-6a et 3-6d (nous l'appellerons par la suite le dislocateur initial). Ce dislocateur consiste en trois patins de Rayleigh avec des poches d'une profondeur de 0,3 mm. Ce dislocateur est très similaire à celui utilisé par l'équipe du Professeur Pascovici sur le banc d'essais de l'Université Polytechnique de Bucarest où il montra les principes de base de la lubrification XPHD en utilisant un feutre imbibé [48].



**Figure 3-6.** Modèles CAO et photographies des dislocateurs : initial (a, d), poche profonde (b, e), plan incliné (c, f).

Dans le cadre de notre étude, ce dislocateur présente un point de départ dans les recherches de la géométrie optimale qui sera spécialement adaptée pour le fonctionnement avec une mousse imbibée. Des calculs d'optimisation de la géométrie pour les dislocateurs avec des patins de type Rayleigh et type plan incliné furent effectués. Le but essentiel de ces calculs était d'obtenir une géométrie optimale permettant de générer une pression la plus forte possible tout en créant un couple le plus faible possible. Suite à cette étape d'optimisation, deux géométries supplémentaires du dislocateur furent retenues.

Le dislocateur présenté Figures 3-6b et 3-6e est composé de patins avec des poches plus profondes (3 mm) et plus longues par rapport au dislocateur initial. Ce dislocateur sera nommé dislocateur poche profonde. Les Figures 3-6c et 3-6f montrent un autre type de dislocateur consistant en trois patins à plan incliné repartis uniformément sur une circonférence. La surface supérieure de chaque patin est inclinée d'un angle de  $3,70^\circ$  par rapport à l'horizontale. Sur ces trois dislocateurs, chaque patin est pourvu d'un thermocouple et d'une prise de pression située proche de la zone de pression maximale.

## III.2. Préparation du banc d'essais XPHD et procédure d'essais

Le fonctionnement correct du banc d'essais nécessite certains travaux préparatoires qui varient selon le mode opérationnel choisi.

Le banc d'essais est installé en position strictement horizontale. Pour permettre d'effectuer ce réglage, il dispose de pieds réglables, ainsi que d'un niveau à bulle circulaire collé sur le bâti permettant de contrôler l'horizontalité du banc. L'étape suivante est la plus délicate et consiste en un réglage du jeu initial qui va nous servir ensuite de référence pour mesurer l'épaisseur de la mousse imbibée et comprimée. Pour ce faire, des cales d'ajustage sont uniformément posées sur le grain mobile et le bras supérieur est accroché au support réglable. En tournant l'écrou de réglage du support, l'ensemble «grain fixe – bras supérieur» descend jusqu'à ce que le dislocateur soit en butée sur les cales. En même temps, les distances entre le bras du guidage et les cales de référence sont mesurées (Figure 3-7). Ces mesures sont nécessaires pour vérifier le jeu initial après la fixation de l'échantillon de la mousse, ainsi que pour diminuer l'influence du jeu constructif de la rotule sur les mesures.

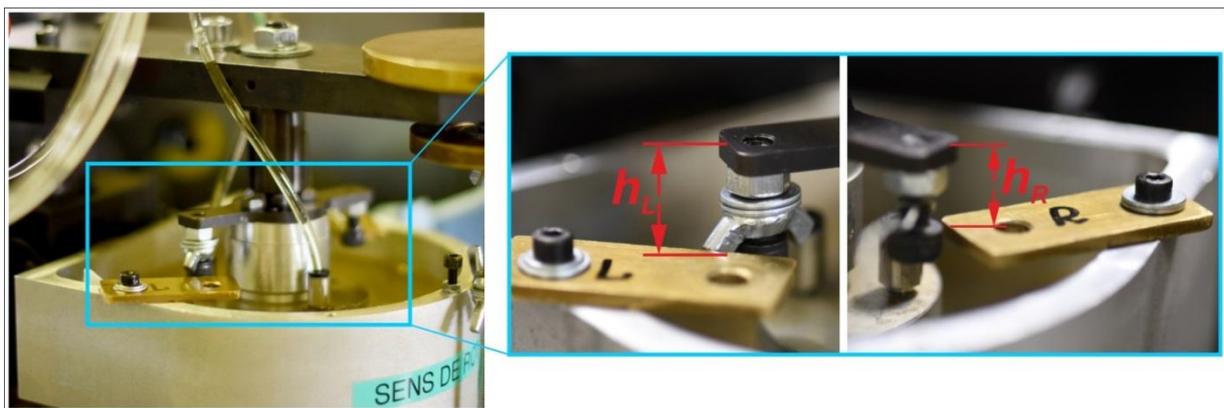


Figure 3-7. Réglage du jeu initial.

Un échantillon de la mousse étudiée d'une épaisseur de 5 mm et d'un diamètre de 80 mm peut être fixé à l'aide de ruban double face (en cas d'utilisation de l'eau), ou être collé avec du silicone pour les essais avec de l'huile ISO VG 46 ou avec des liquides non-newtoniens. À chaque fois, de la même manière que pour les mesures de la perméabilité avec le perméamètre longitudinal, l'épaisseur de la mousse est corrigée en déduisant l'épaisseur de l'adhésif.

Après la fixation de la mousse, le réservoir est rempli du liquide et l'échantillon de mousse est imbibé manuellement en appuyant sur la mousse avec une spatule pour améliorer la pénétration du liquide dans l'échantillon. Par la suite, en mettant le bras supérieur en position initiale, on vérifie la distance entre le guidage et les cales de référence et donc, le jeu initial. Pour éliminer l'air de toutes les conduites et ainsi diminuer les perturbations des mesures de la pression, le banc d'essais est lancé à faible vitesse et des purgeurs sont actionnés. À la fin de cette procédure, la quantité de liquide nécessaire aux essais est remise dans le réservoir jusqu'à immersion complète du grain fixe.

Les essais pour chaque épaisseur de mousse sont réalisés pour des vitesses de rotation allant de 50 à 340 tr/min par pas de 50 tr/min. Après chaque changement de vitesse, on laisse tourner le banc d'essais pendant 10 secondes pour stabiliser la pression générée par le système. L'enregistrement des données expérimentales s'effectue pendant 20 secondes. Les variations d'épaisseur de la mousse sont réalisées grâce au support réglable, qui permet d'abaisser ou d'élever le bras supérieur, et donc le dislocateur, au-dessous ou au-dessus de la position initiale. La mesure du jeu est faite par le capteur de déplacement à contact installé au-dessus du bras supérieur.

Comme déjà mentionné auparavant, la procédure de préparation du banc d'essais en mode charge imposée comporte certaines particularités. La référence permettant de mesurer l'épaisseur de la mousse imbibée correspond à la position du dislocateur en butée avec le grain mobile (i.e. le jeu initial est nul). Le bras supérieur dans ce cas ne repose pas sur le support réglable ; la charge est appliquée sur le côté libre du bras en utilisant des masses calibrées. Dans ce mode du fonctionnement, l'ensemble «bras supérieur – dislocateur» et la charge sont supportés grâce aux forces ex-poro-hydrodynamiques générées par le système. L'épaisseur de la mousse imbibée est mesurée de la même façon que pour le mode de fonctionnement à géométrie imposée.

### **III.3. Résultats expérimentaux**

Dans le cadre de nos études du mécanisme de la lubrification XPHD, huit campagnes d'essais furent réalisées. Chaque campagne d'essais eut pour but d'étudier l'influence des différents paramètres sur les performances de la lubrification XPHD. En faisant une synthèse de tous les résultats expérimentaux il est pertinent de regrouper les essais en trois catégories :

- ❖ Essais en mode «géométrie imposée» avec différents liquides et le dislocateur initial ;
- ❖ Essais en mode «charge imposée» avec le dislocateur initial ;
- ❖ Essais en mode «géométrie imposée» avec les trois types de dislocateurs (initial, poche profonde et plan incliné) en combinaison avec l'eau et l'huile ISO VG 46.

Concernant les essais de la première catégorie, ils ont pour but d'investiguer l'influence de différents lubrifiants sur le mécanisme de la lubrification XPHD. La deuxième catégorie des essais fut effectuée avec l'objectif de déterminer la charge que le système était capable de supporter. Enfin, la dernière catégorie permet de comparer les trois types de dislocateurs et donc de définir la géométrie la plus adaptée pour l'application XPHD.

### **III.3.1. Résultats expérimentaux : essais en mode «géométrie imposée» avec différents types de liquides et le dislocateur initial**

Les essais de cette première catégorie furent réalisés avec différents liquides : l'eau, l'huile de moteur TOTAL 5W30 et des liquides non-newtoniens (deux solutions à 1% et 2% de polyoxyéthylène et deux solutions à 1% et 2% de carboxyméthylcellulose sel de sodium). Les solutions furent préparées au sein de notre laboratoire et par la suite caractérisées avec le rhéomètre hybride Discovery HR-2 dans le laboratoire de rhéologie de l'Institut PPRIME<sup>2</sup> (les caractéristiques rhéologiques des liquides non-newtoniens sont fournies en Annexe 4). En se basant sur les résultats de la caractérisation rhéologique, nous pouvons constater que les solutions de polyoxyéthylène représentent des fluides rhéofluidifiants (ou pseudo-plastiques) [69] dont les viscosités apparentes peuvent être décrites par la loi Carreau–Yasuda.

Les résultats expérimentaux représentant la variation de la pression et du couple en fonction de la vitesse de rotation sont présentés respectivement sur les Figures 3-8 et 3-9.

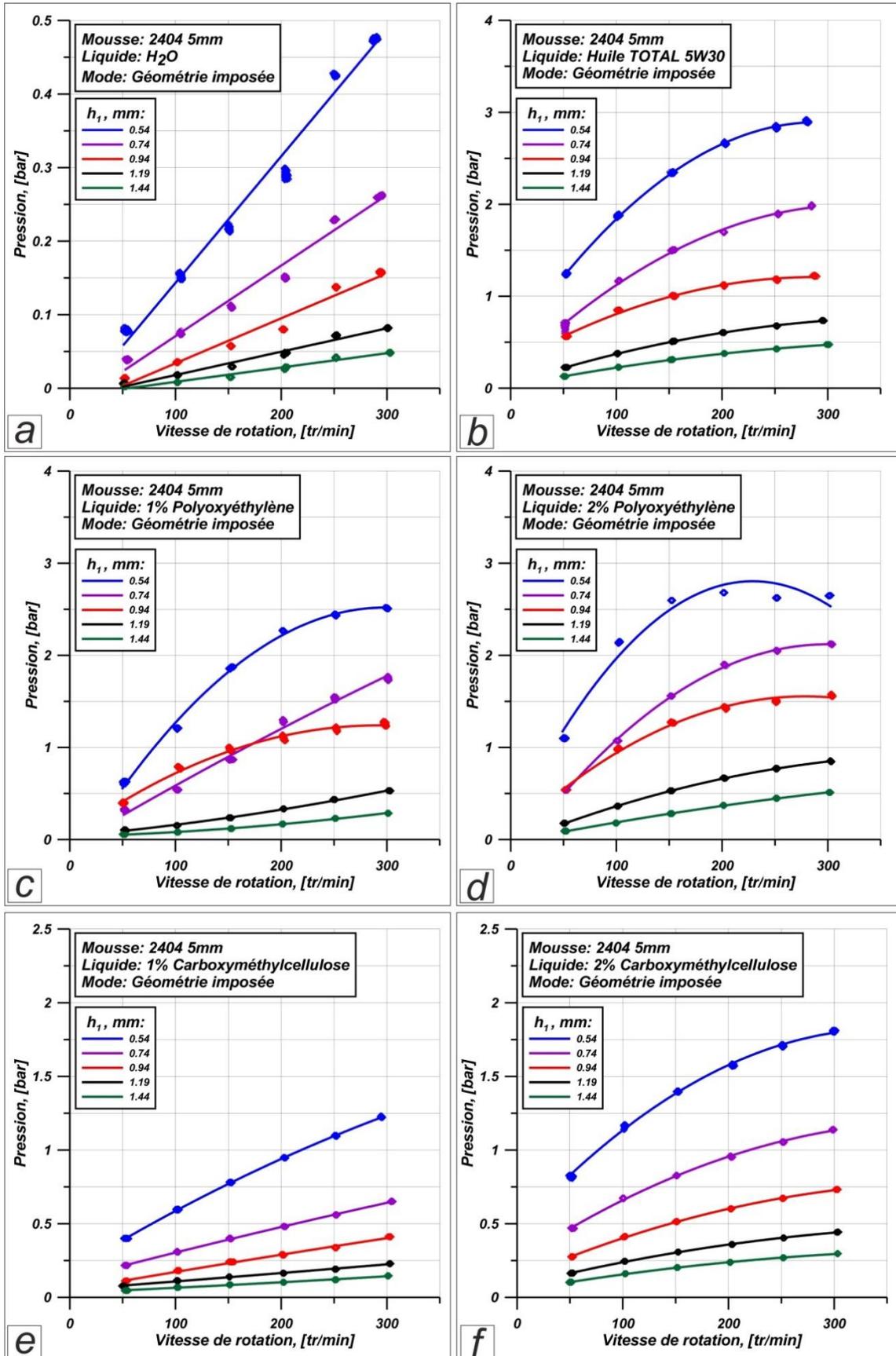
En ce qui concerne les essais avec de l'eau, la pression augmente linéairement avec la vitesse de rotation. De plus, on remarque que plus l'épaisseur de la mousse est faible, plus la pente de la droite augmente. La pression atteint 0,47 bar à une vitesse de 280 tr/min (Figure 3-8a).

Les essais réalisés avec l'huile de moteur TOTAL 5W30 montrent que la pression augmente non linéairement avec l'augmentation de la vitesse de rotation (Figure 3-8b). Comme la variation de la température du fluide est inférieure à 1°C, cette non-linéarité peut être expliquée par deux effets. D'une part, l'augmentation de la vitesse peut générer des problèmes d'imbibition de la mousse et d'autre part, on peut avoir une variation de la viscosité du fluide avec le taux de cisaillement (comportement non-newtonien). Cependant, pour l'huile utilisée, le comportement rhéofluidifiant commence à apparaître à des taux de cisaillements supérieurs à  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  qui ne sont pas atteints pour les vitesses de rotation utilisées lors des essais présentés dans ce chapitre. Nous pouvons donc considérer que le comportement rhéologique de l'huile de moteur est newtonien. Néanmoins, la viscosité dynamique à la température de fonctionnement du banc est d'environ 0,1 Pa·s et donc supérieure de deux facteurs de grandeur à la viscosité de l'eau. Il en résulte une pression mesurée plus importante (jusqu'à 3 bar) mais aussi une moindre imbibition de la mousse, surtout pour des vitesses de rotation élevées.

Les Figures 3-8c et 3-8d présentent la variation de la pression pour deux solutions de polyoxyéthylène à 1% et à 2% avec des viscosités de 0,02 Pa·s et 0,12 Pa·s respectivement à la température de fonctionnement et à un taux de cisaillement presque nul (voir Annexe 4).

---

<sup>2</sup> Les travaux de caractérisation des liquides non-newtoniens furent réalisés en coopération avec Sébastien JARNY, notre collègue du Département «Fluides, Thermique et Combustion», l'axe Hydrodynamique et Écoulements Environnementaux, l'équipe Rhéologie.



**Figure 3-8.** Résultats des essais ( $P=f(V)$ ) en mode géométrie imposée avec différents types de liquides [ $h_1=0,54$  mm correspond à  $\varepsilon=0,63$ ] : a) eau, b) huile TOTAL 5W30, c) 1% de Polyoxyéthylène, d) 2% de Polyoxyéthylène, e) 1% de Carboxyméthylcellulose, f) 2% de Carboxyméthylcellulose.

Comme pour l'huile de moteur, la pression augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la vitesse. Pour la solution à 1%, la viscosité de référence est largement inférieure à celle de l'huile de moteur. Cependant, les niveaux de pression maximale obtenus pour une vitesse de 300 tr/min sont presque les mêmes, ce qui suggère une meilleure compatibilité entre la mousse et la solution de polyoxyéthylène.

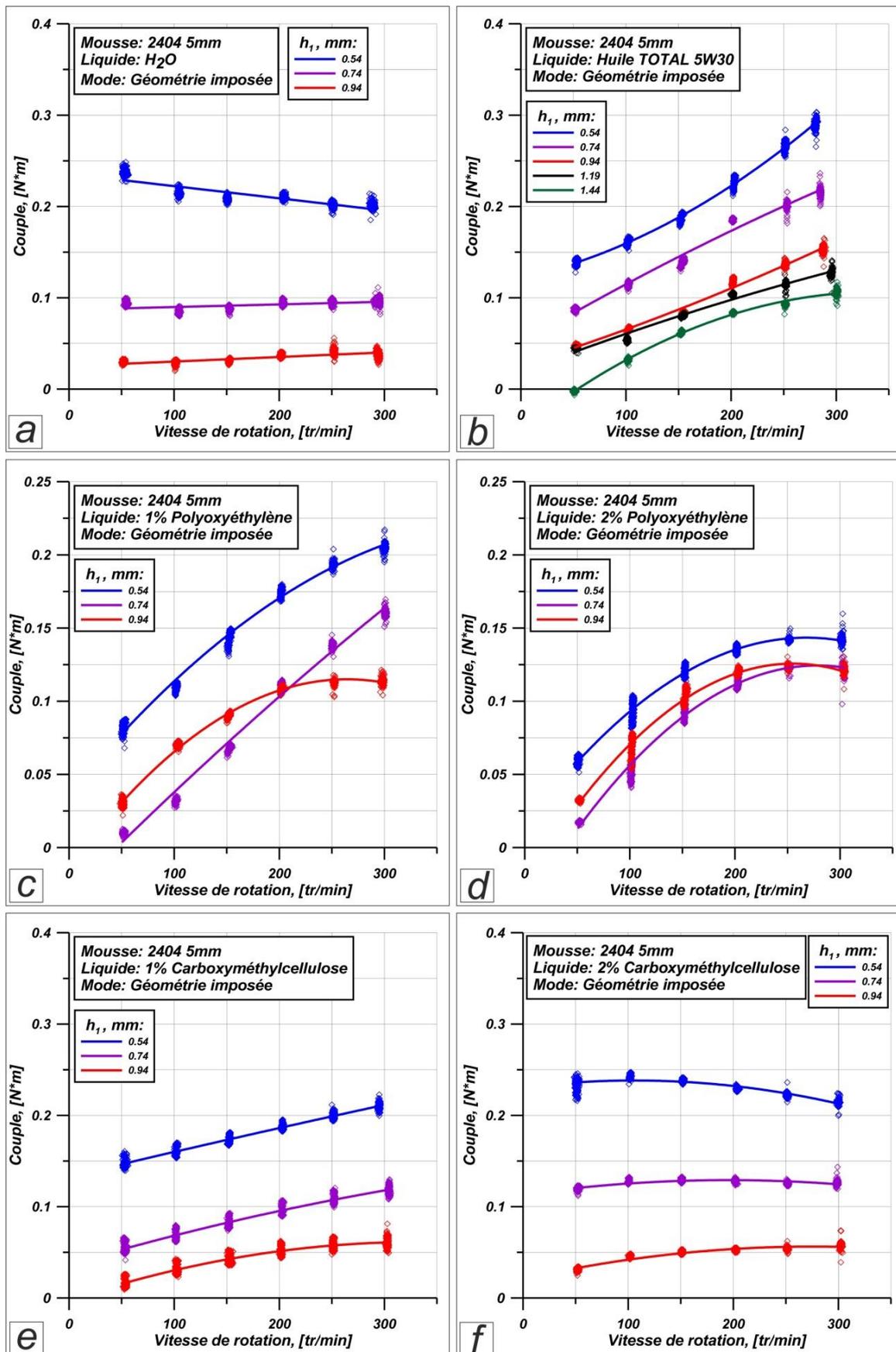
Dans le cas d'une concentration à 2%, les niveaux de pression ne sont pas très différents. L'explication peut se trouver dans le comportement non-newtonien des deux solutions qui, par exemple, pour des taux de cisaillements supérieurs à  $1500 \text{ s}^{-1}$ , conduit à des viscosités dynamiques du même ordre de grandeur. On note que pour une compression maximale de la mousse et une vitesse supérieure à 150 tr/min, la pression n'augmente plus avec la vitesse de rotation.

La dernière série de résultats est présentée pour des solutions de carboxyméthylcellulose (Figures 3-8e et 3-8f). Pour la solution à 1% (viscosité de  $0,08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), la variation de la pression est presque linéaire. Pour la solution à 2% (viscosité de  $0,54 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), la variation de la pression avec la vitesse de rotation montre encore une non-linéarité qui peut être expliquée par une mauvaise imbibition de la mousse à des vitesses élevées, couplée avec un comportement non-newtonien du lubrifiant. Il est intéressant de noter que même si les viscosités des solutions de carboxyméthylcellulose sont supérieures à celles des solutions de polyoxyéthylène, les niveaux des pressions mesurés sont inférieurs. Nous pensons que ce comportement est lié aux propriétés viscoélastiques des solutions de polyoxyéthylène (malheureusement, non caractérisées dans cette étude) qui semblent améliorer le comportement du système. Ce point peut, par ailleurs, expliquer qu'une solution de polyoxyéthylène avec une viscosité initiale de  $0,02 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  génère les mêmes niveaux de pression que l'huile de moteur qui a une viscosité 5 fois supérieure.

Pour commencer l'analyse des résultats des mesures du couple provoqué par l'interaction entre le dislocateur et la mousse imbibée, nous devons préciser que pour certaines épaisseurs, les valeurs du couple, très faibles, ne sont pas présentées sur la Figure 3-9. En effet, ces valeurs entrent dans la plage d'erreur du capteur et ne peuvent donc pas être mesurées avec suffisamment de précision pour être représentatives.

La Figure 3-9a montre la variation du couple pour les essais réalisés avec de l'eau. On peut voir que le couple est plus important pour les épaisseurs les plus faibles. Les valeurs du couple sont quasiment constantes, ce qui signifie que le frottement visqueux est négligeable pour cette configuration. En effet, le couple résistant est surtout généré par l'interaction entre le bord du dislocateur et la mousse.

Les résultats des mesures pour l'huile TOTAL 5W30 sont présentés Figure 3-9b. Globalement, on peut constater que le couple augmente avec la vitesse de rotation. Ce comportement montre que la composante visqueuse n'est plus négligeable. En comparant les graphes pour l'eau et l'huile 5W30, et en particulier pour l'épaisseur de  $0,54 \text{ mm}$ , on peut remarquer que le couple mesuré pour la faible vitesse de rotation ( $50 \text{ tr/min}$ ) avec de l'eau est plus important que celui mesuré avec de l'huile. Nous avons déjà montré au chapitre II.4 que le comportement mécanique de la mousse était fortement influencé par la présence du fluide. Pourtant, à faible vitesse de rotation, il est raisonnable de supposer que le couple est surtout généré par la résistance mécanique de la mousse s'opposant à l'avancement du dislocateur.



**Figure 3-9.** Résultats des essais (Couple=f(V)) en mode géométrie imposée avec différents types de liquides [ $h_1=0,54$  mm correspond à  $\varepsilon=0,63$ ] : a) eau, b) huile TOTAL 5W30, c) 1% de Polyoxyéthylène, d) 2% de Polyoxyéthylène, e) 1% de Carboxyméthylcellulose, f) 2% de Carboxyméthylcellulose.

Si le couple résistant est plus faible dans le cas de l'huile, on peut donc supposer que la nature de lubrifiant influence le comportement mécanique de la mousse.

Les essais réalisés avec les solutions de polyoxyéthylène (Figures 3-9c et 3-9d) montrent aussi que la croissance de la vitesse provoque l'augmentation du couple qui dépend à son tour de l'épaisseur de la mousse imbibée. Le couple maximal pour la solution à 1% est plus important que celui mesuré pendant les essais avec la solution à 2% de polyoxyéthylène. Pour les essais avec 2% de polyoxyéthylène on peut observer une augmentation jusqu'à 250 tr/min et par la suite une légère diminution ou stabilisation du couple.

La variation du couple en fonction de la vitesse de rotation pour le deuxième liquide non-newtonien est présentée sur les Figures 3-9e et 3-9f. Pour la solution à 1%, le couple a tendance à augmenter linéairement avec la vitesse de rotation, tandis que pour la solution à 2%, le couple ne suit pas la même tendance pour toutes les épaisseurs. Pour l'épaisseur de 0,94 mm le couple présente une augmentation légère, pour l'épaisseur de 0,74 mm il devient quasiment constant et pour l'épaisseur de 0,54 mm, le couple diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Le comportement est alors très proche de celui de l'eau.

Cette première campagne d'essais représente les premiers résultats obtenus dans notre laboratoire sur un système de guidage XPHD. L'analyse des résultats expérimentaux montra la complexité des phénomènes sous-jacents à ce type de lubrification ainsi que son caractère multi-physiques. Par ailleurs, l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus peut servir de base de données pour des comparaisons avec des résultats de modélisation numérique.

### III.3.2. Résultats expérimentaux : essais en mode «charge imposée» avec le dislocateur initial

Pour cette deuxième catégorie, les essais furent réalisés en mode «charge imposée» avec le dislocateur initial. Les mêmes liquides que ceux des essais de la première catégorie furent utilisés.

Comme nous l'avons précisé auparavant, des poids calibrés sont appliqués sur le côté libre du bras supérieur et le déplacement de l'ensemble «dislocateur – bras supérieur», donc l'épaisseur de la mousse imbibée, est mesuré à l'aide du capteur de déplacement à contact positionné au-dessus du bras supérieur.

Les résultats expérimentaux de cette campagne d'essais sont représentés sur les Figures 3-10 à 3-14.

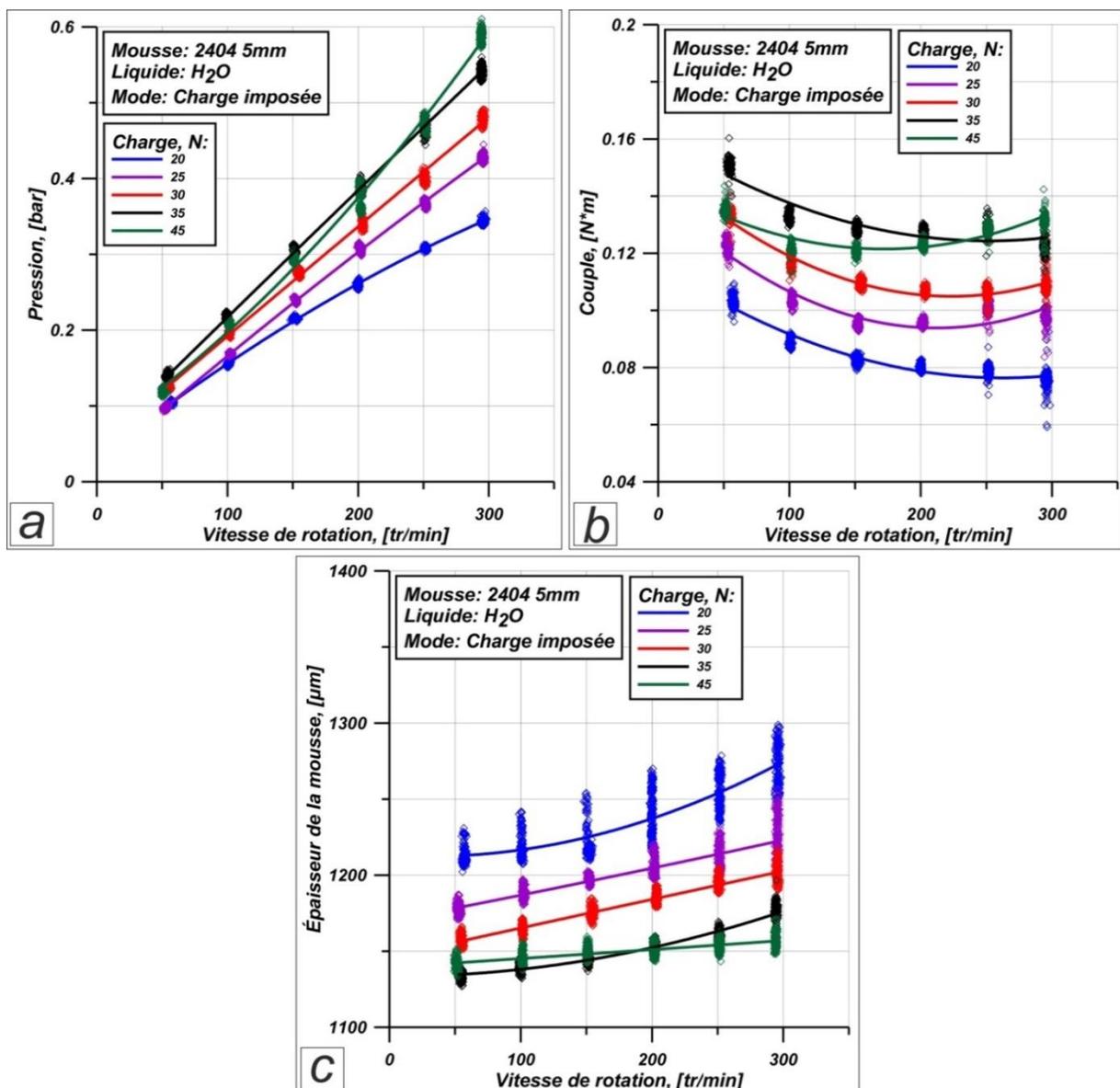
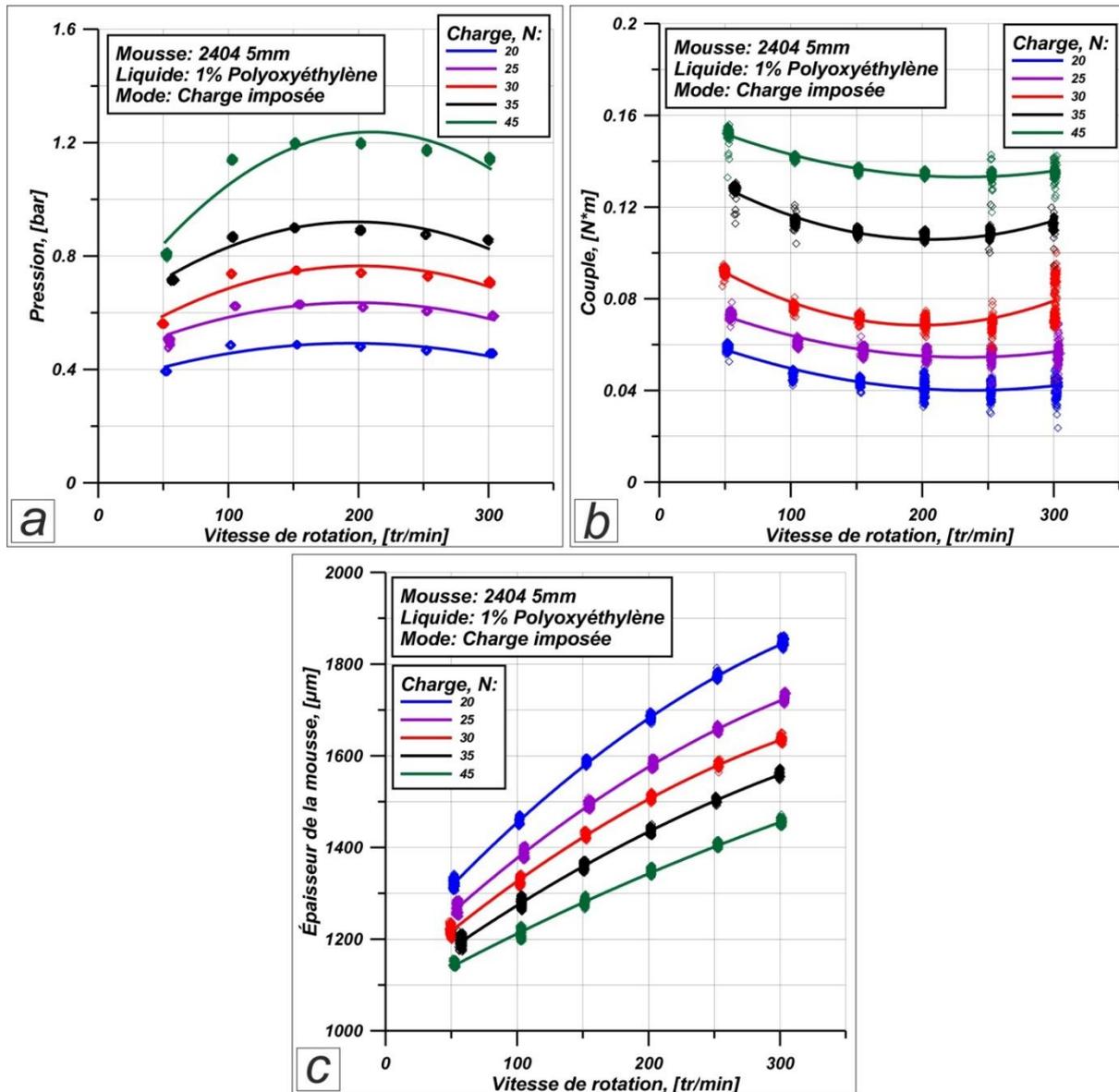


Figure 3-10. Résultats des essais avec de l'eau en mode charge imposée pour le dislocateur initial.

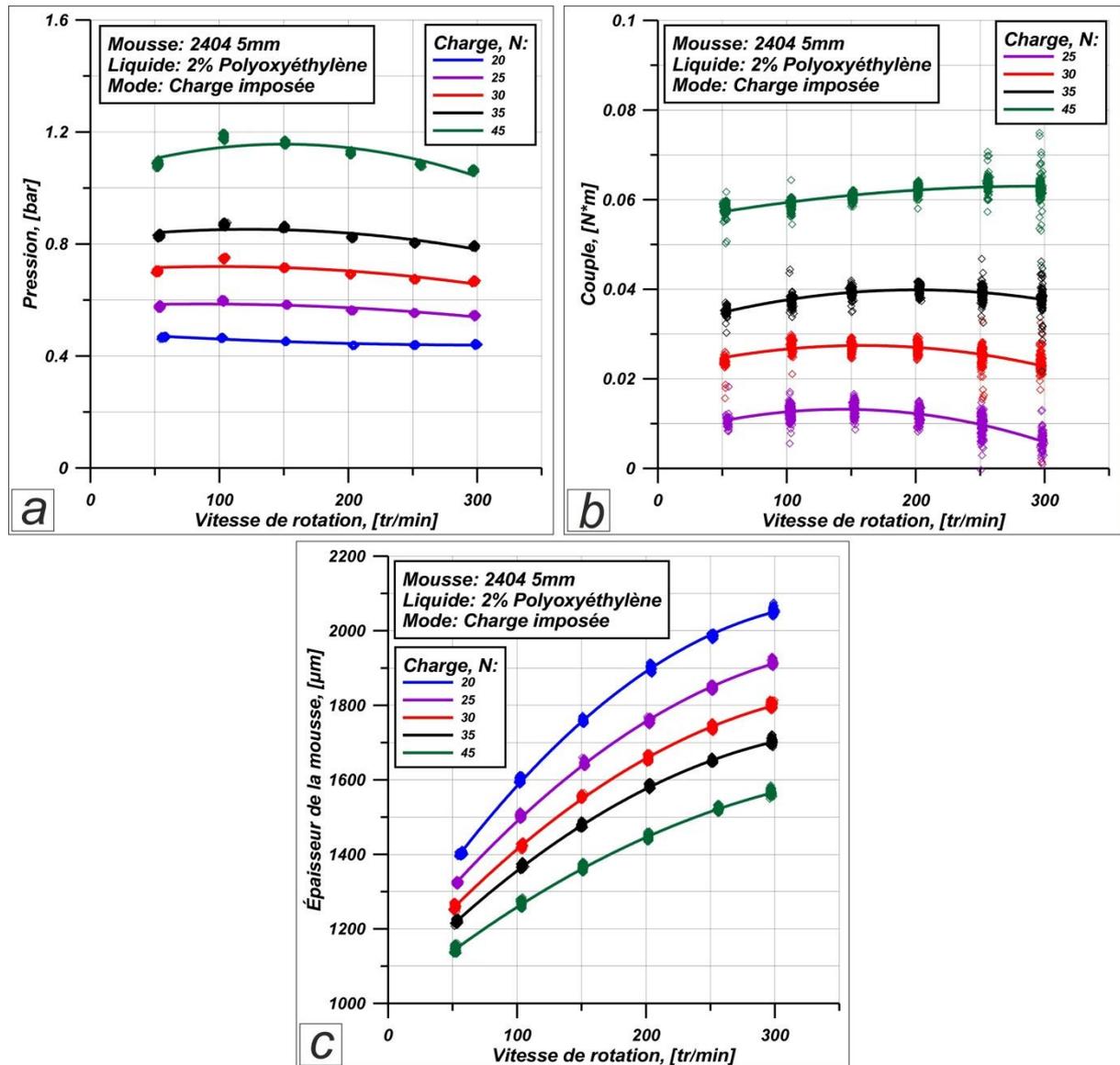
Les variations de la pression, du couple et de l'épaisseur de la mousse pour les essais avec de l'eau sont données sur la Figure 3-10. On peut observer que la pression augmente linéairement avec la vitesse de rotation, ainsi qu'avec la charge imposée. Le couple varie de manière non linéaire : au début il diminue jusqu'à certaines vitesses de rotation (200-250 tr/min suivant le cas) et par la suite il montre une légère croissance, probablement due à l'imbibition insuffisante de la mousse. En s'intéressant aux graphes représentant la variation de l'épaisseur de la mousse (Figure 3-10c), on voit que l'épaisseur augmente avec la vitesse de rotation. Cependant, lorsque la charge est faible, l'épaisseur de la mousse imbibée n'est pas stable et donc on remarque une dispersion significative des points expérimentaux.



**Figure 3-11.** Résultats des essais avec la solution à 1% de polyoxyéthylène en mode charge imposée pour le dislocateur initial.

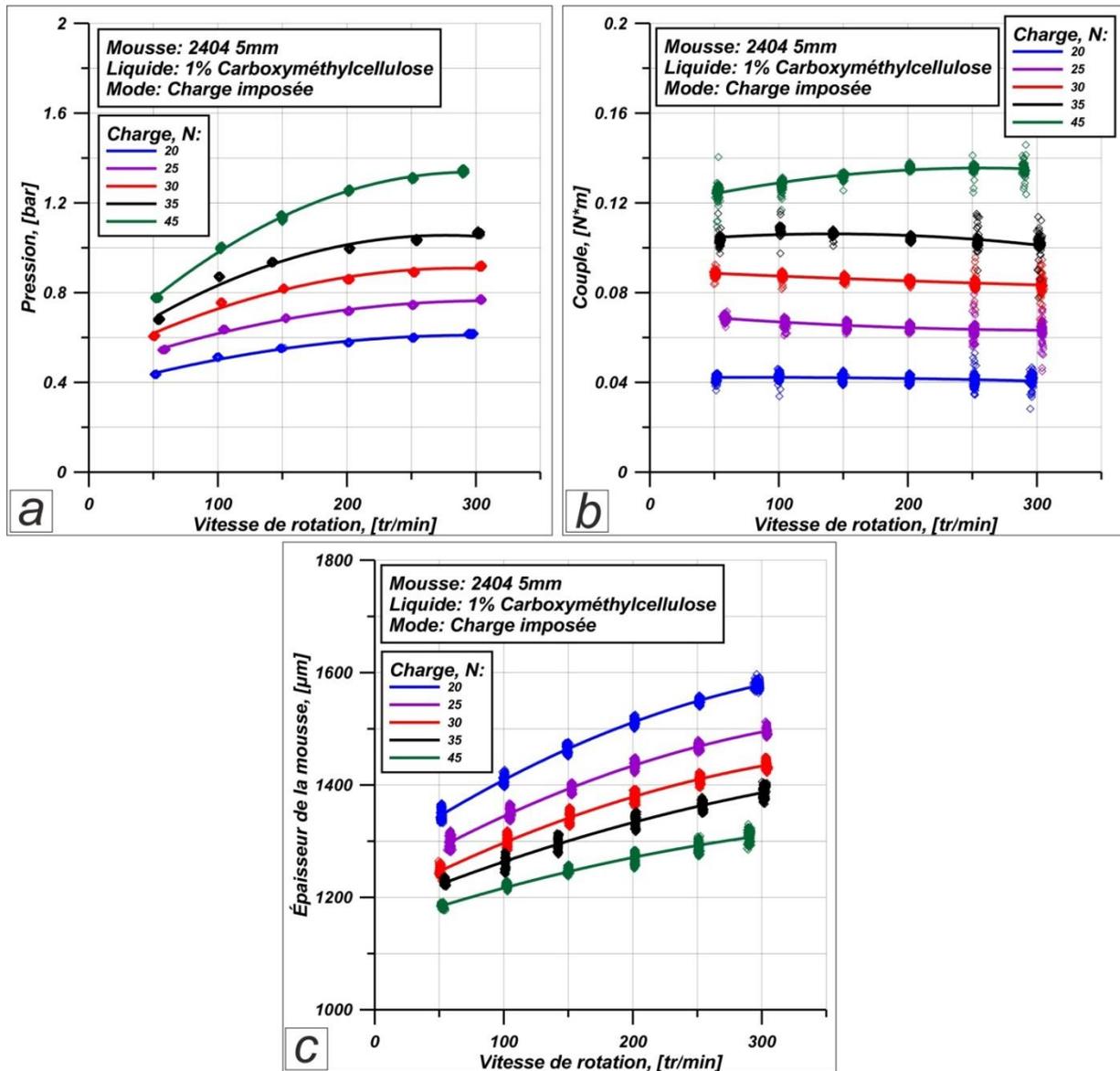
Les résultats obtenus des essais avec la solution à 1% de polyoxyéthylène sont représentés sur la Figure 3-11. On note une variation non linéaire de la pression et du couple en fonction de la vitesse de rotation. Dans la zone des vitesses 0-150 tr/min on observe une

augmentation de la pression, tandis que pour les vitesses supérieures à 150 tr/min la pression générée par le système diminue légèrement alors que le couple se stabilise. Quant à l'épaisseur de la mousse imbibée, comme l'on pouvait s'y attendre, elle augmente avec la vitesse de rotation et diminue lorsque la charge imposée augmente.



**Figure 3-12.** Résultats des essais avec la solution à 2% de polyoxyéthylène en mode charge imposée pour le dislocateur initial.

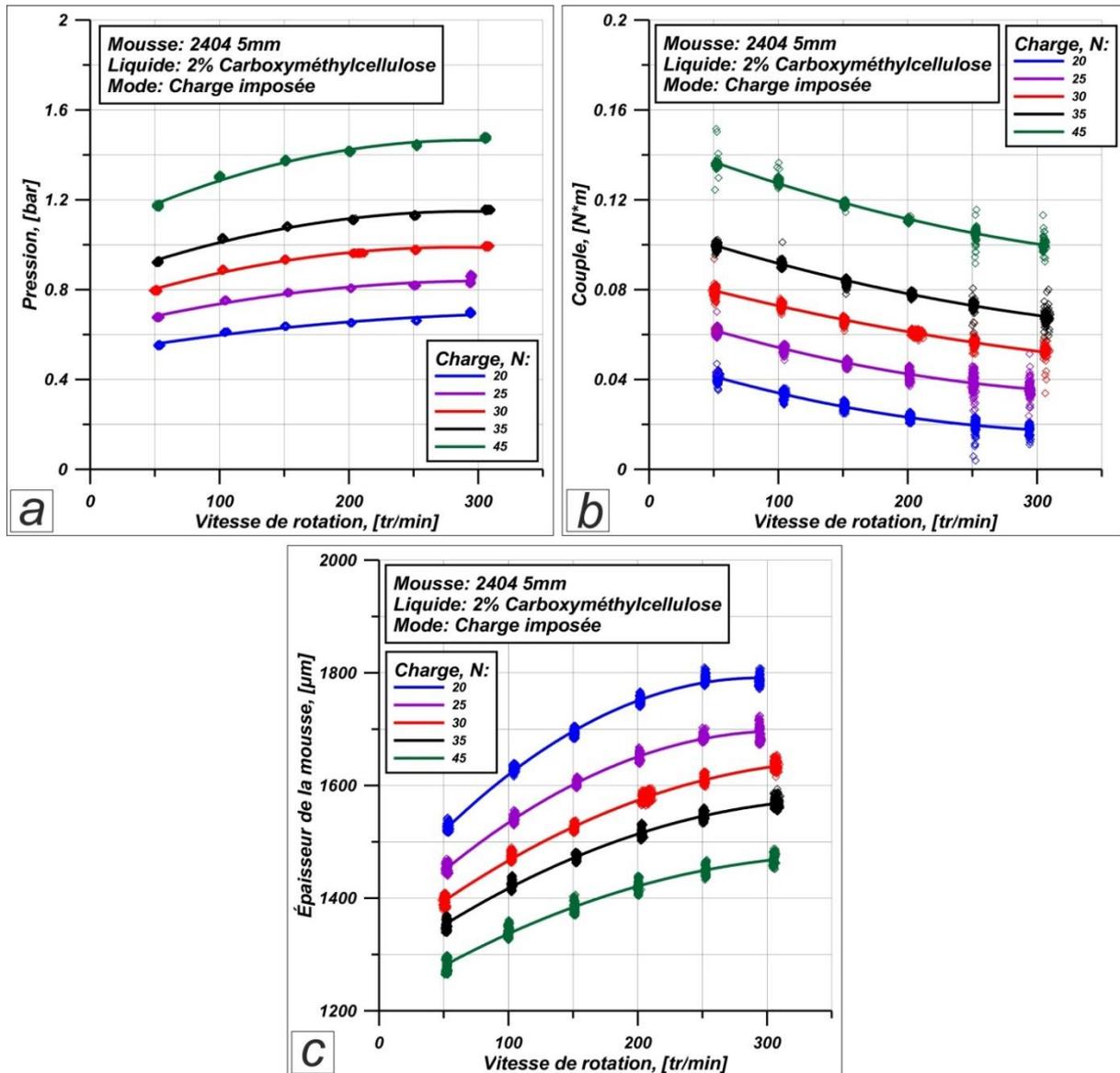
La Figure 3-12 présente les résultats des essais avec la solution à 2% de polyoxyéthylène. Pour ce type de liquide non-newtonien, la pression a tendance à diminuer avec la vitesse de rotation. Cette décroissance de la pression est causée par la variation de la viscosité de solution. En même temps, on ne peut pas exclure l'influence de l'effet de ré-imbibition de la mousse sur la pression générée par le système. En effet, la viscosité plus importante de la solution à 2% par rapport à la solution à 1%, la ré-imbibition est sans aucun doute plus difficile avec le fluide le plus visqueux. Nous pouvons remarquer que la variation du couple est non linéaire : il a tendance à augmenter puis diminuer avec la croissance de la vitesse de rotation sauf pour le cas à 45N où il augmente continuellement avec la vitesse.



**Figure 3-13.** Résultats des essais avec la solution à 1% de carboxyméthylcellulose en mode charge imposée pour le dislocateur initial.

Les résultats des essais avec la solution de 1% de carboxyméthylcellulose sont présentés sur la Figure 3-13. Là encore, on peut constater que la pression générée par le système augmente avec la vitesse de rotation. On note que le couple présente une très faible variation avec la vitesse de rotation. Cependant, il augmente avec l'augmentation de la charge qui est accompagnée par une diminution de l'épaisseur.

La Figure 3-14 représente la variation des paramètres du système pour les essais avec la solution à 2% de carboxyméthylcellulose. Comme dans les cas précédents, la pression augmente avec la vitesse de rotation, mais les valeurs maximales de la pression sont plus grandes en raison de la viscosité plus importante de la solution à 2%. La croissance de la pression provoque l'augmentation de l'épaisseur de la mousse et donc permet au couple de diminuer. En même temps, on peut supposer que cette décroissance du couple est due non seulement à l'augmentation de la pression, mais également à la variation de la viscosité de la



**Figure 3-14.** Résultats des essais avec la solution à 2% de carboxyméthylcellulose en mode charge imposée pour le dislocateur initial.

solution utilisée (on rappelle ici que l'effet non newtonien est plus significatif pour les concentrations plus importantes).

Pour conclure cette deuxième catégorie d'essais, on peut constater que le système basé sur le mécanisme de la lubrification XPHD est capable de supporter une charge imposée donnée pour de faibles vitesses de rotation (jusqu'à 300 tr/min). La pression générée par le système, comme c'était le cas pour les essais en mode «géométrie imposée», dépend des lubrifiants utilisés : les liquides plus visqueux permettent de générer plus de pression. En outre, l'utilisation de liquides non newtoniens, nous permet d'obtenir des résultats assez intéressants. En particulier, la solution à 2% de polyoxyéthylène donne la possibilité de générer une pression importante et d'avoir un couple très faible. Nous reprecisons ici qu'en raison de la courte durée des essais, l'usure de la mousse peut être négligée ainsi que la variation de la température dans la zone de contact.

### **III.3.3. Résultats expérimentaux : essais en mode «géométrie imposée» avec les trois types de dislocateurs**

Les essais expérimentaux en mode «géométrie imposée» ont pour but de comparer trois types de dislocateurs et donc de définir la géométrie la plus adaptée pour les applications XPHD. À cet effet, trois séries d'essais furent réalisées pour le dislocateur initial, le dislocateur à poche profonde et le dislocateur plan incliné en combinaison avec de l'eau ou avec de l'huile ISO VG 46. Les résultats expérimentaux de cette troisième catégorie d'essais, notamment la variation de la pression et du couple en fonction de la vitesse de rotation sont représentés respectivement sur les Figures 3-15 et 3-17. Nous précisons ici, que l'épaisseur de la mousse imbibée comprimée ( $h_1$ ) (voir Figure 3-4) pour ces essais varie entre 1,2 mm et 1,7 mm. Cette plage d'épaisseur permet d'obtenir la variation des paramètres significatifs sans endommagement important de l'échantillon étudié. De plus, les taux de compression de la mousse sont compatibles avec les taux de compression utilisés lors de la détermination de la perméabilité.

Commençons l'analyse des résultats expérimentaux par les essais avec le dislocateur initial. La Figure 3-15a présente la variation de la pression pour les trois séries d'essais réalisées avec de l'eau. La pression générée grâce à l'effet ex-poro-hydrodynamique augmente linéairement avec la vitesse de rotation. On note que, d'un essai à l'autre, réalisé sur le même échantillon, la pression a tendance à diminuer ce qui peut s'expliquer par une évolution des caractéristiques mécaniques de la mousse. La pression maximale mesurée pour la plus faible épaisseur de la mousse ne dépasse pas 0,35 bar.

La Figure 3-15b montre les variations de la pression pour les essais avec le même dislocateur en combinaison avec l'huile ISO VG 46. En raison de la viscosité plus importante de l'huile par rapport à l'eau, l'augmentation de la pression est plus importante. L'utilisation de l'huile permet d'atteindre une pression maximale générée par le système d'environ 2,5 bar.

Les Figures 3-15c et 3-15d montrent les résultats des mesures de la pression pour les essais avec de l'eau et de l'huile pour le dislocateur équipé de trois patins avec les poches profondes (profondeur 3 mm). Nous pouvons voir que la pression pour les essais avec de l'eau augmente de manière linéaire avec la vitesse de rotation, tandis que pour les essais à l'huile cette tendance est non linéaire. Les pressions générées avec ce type de dislocateur sont beaucoup plus faibles que celles obtenues avec le dislocateur initial à cause de la surface de contact plus grande de ce dernier (Figures 3-16a et 3-16b). En effet, dans le cas de dislocateur initial, la mousse est comprimée non seulement par la surface plane horizontale du patin (qui elle aussi est plus grande que celle du dislocateur avec la poche profonde), mais aussi par la surface plane horizontale de la poche qui a une profondeur de seulement 0,3 mm alors qu'elle est de 3 mm pour le deuxième type de patin.

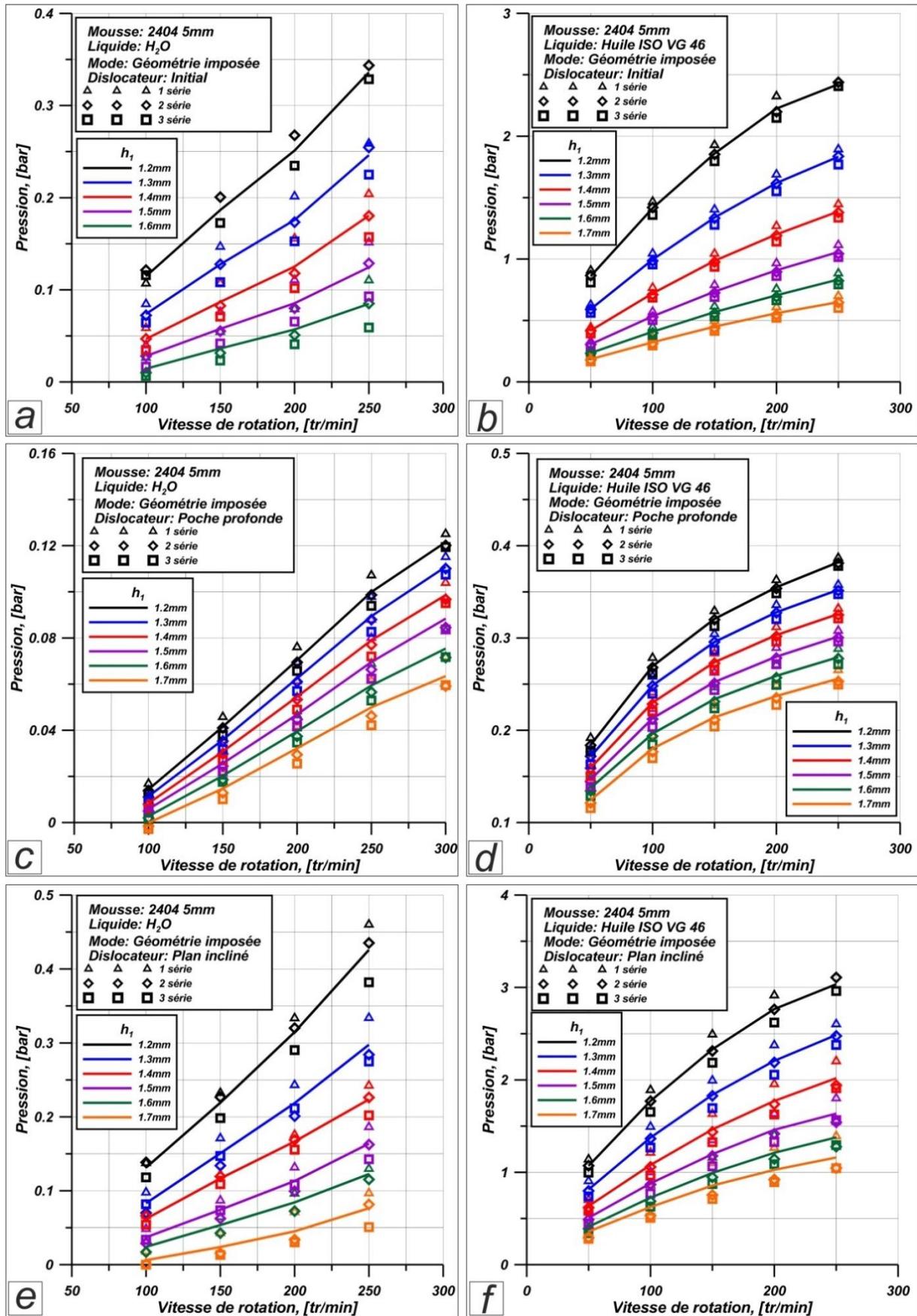
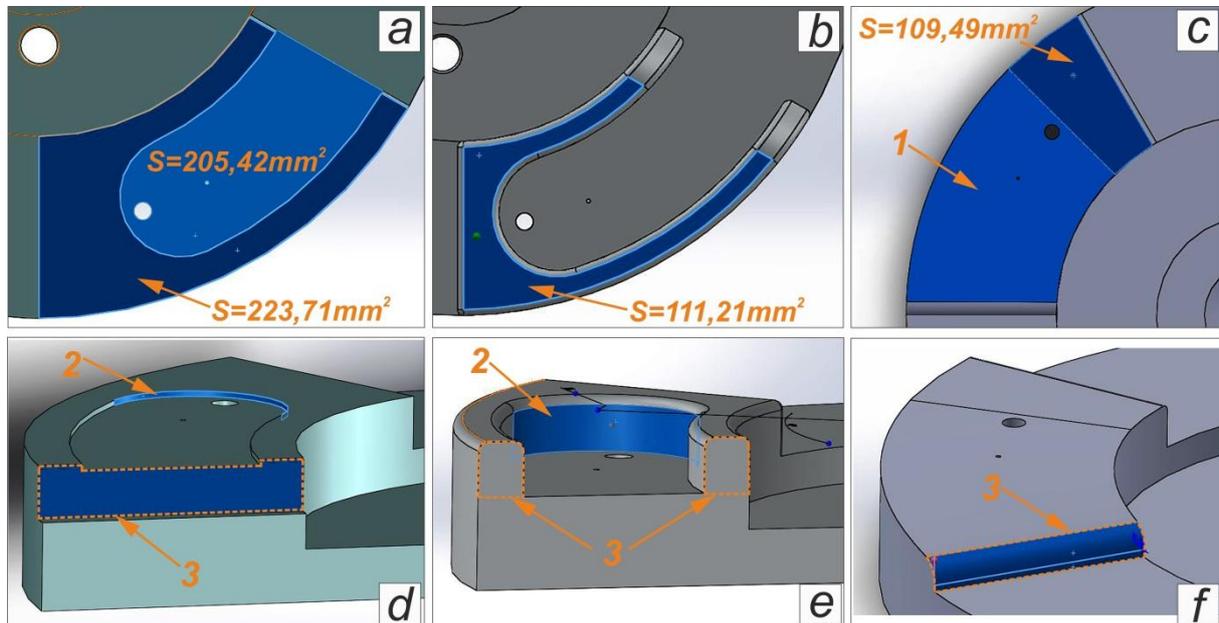


Figure 3-15. Résultats des essais ( $P=f(V)$ ) en mode géométrie imposée avec l'eau et l'huile ISO VG 46 [ $h_1=1,2$  mm correspond à  $\varepsilon=0,83$ ] : a, b) dislocateur initial, c, d) dislocateur poche profonde, e, f) dislocateur plan incliné.

Cependant, on remarque que la dispersion entre les trois séries d'essais est beaucoup plus faible et due probablement à la géométrie particulière du dislocateur avec la poche profonde, qui permet de garder toujours une quantité suffisante de liquide dans la zone du contact et donc de diminuer l'influence de l'effet de ré-imbibition de la mousse.



**Figure 3-16.** Surfaces de contact planes horizontales et latérales : a, d) dislocateur initial, b, e) dislocateur poche profonde, c, f) dislocateur plan incliné [1 – surface inclinée, 2 – paroi arrière de la poche, 3 – bord d’attaque].

Les résultats des mesures de la pression pour les essais avec le dislocateur plan incliné en combinaison avec de l'eau et l'huile ISO VG 46 sont présentés sur les Figures 3-15e et 3-15f. Comme on peut le voir sur ces graphes, la pression croît avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Les pressions générées par le système avec ce type de dislocateur sont les plus importantes, dépassant les 3 bar alors que pour les deux géométries précédemment mentionnées, elles étaient respectivement de 0,4 et 3 bar.

Le paramètre suivant qui fut étudié durant cette troisième catégorie d'essais est le couple résistant produit par l'interaction du dislocateur avec la mousse imbibée comprimée. Les graphes représentant la variation du couple en fonction de la vitesse de rotation sont donnés sur la Figure 3-17 (on présente ici seulement les graphes pour la deuxième série d'essais ; pour les autres séries les graphes sont similaires).

Les essais avec le dislocateur initial en combinaison avec de l'eau montrent une croissance du couple dans une plage de vitesses de rotation de 0-150 tr/min. Pour les vitesses supérieures, le couple change de comportement et montre une certaine régression. On remarque que cette variation du couple devient très significative pour les épaisseurs de mousse les plus faibles (Figure 3-17a).

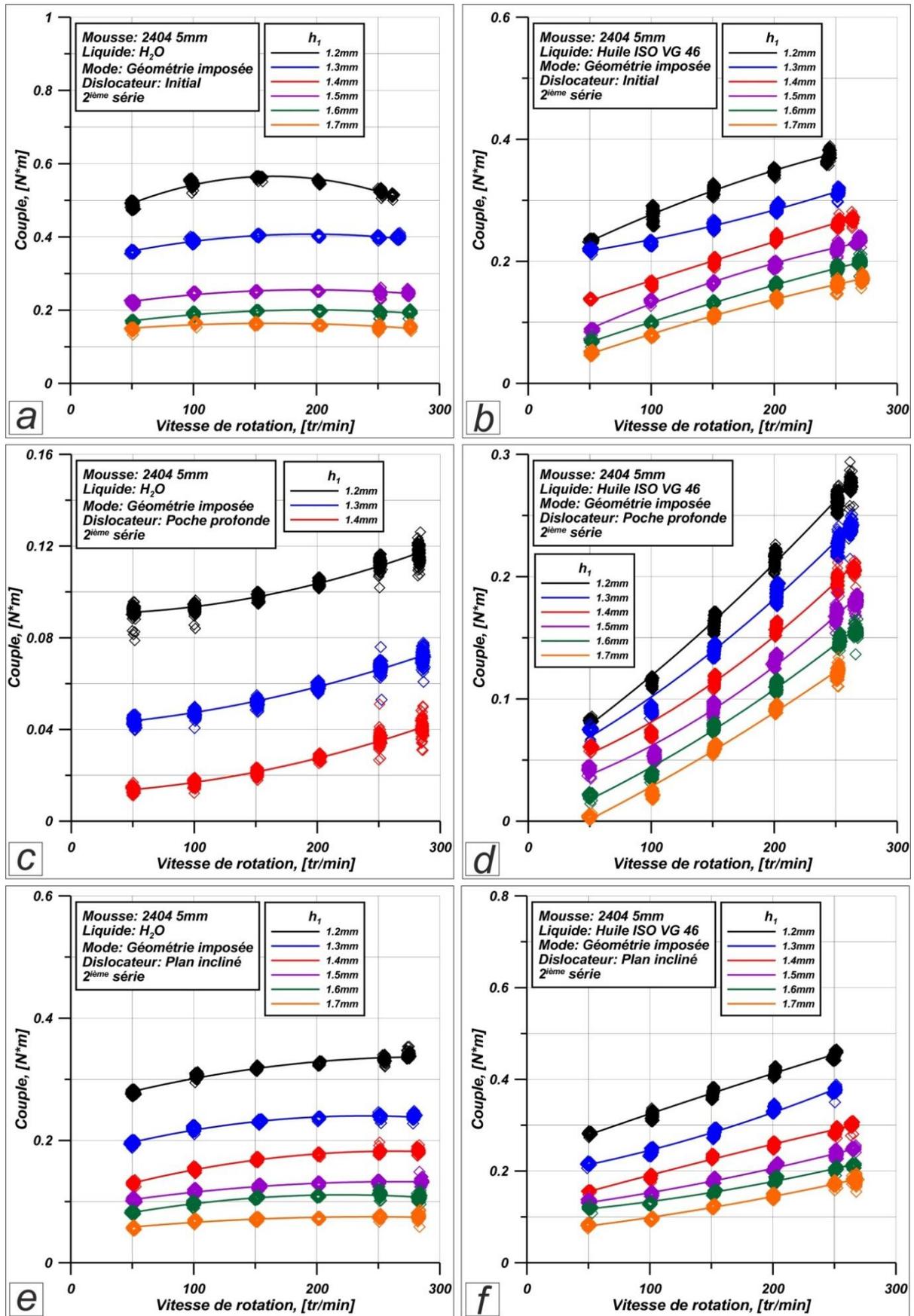
Le comportement du couple est complètement différent pour les essais avec l'huile ISO VG 46. Dans ce cas, le couple augmente progressivement avec la vitesse de rotation. Malgré cette augmentation du couple, les valeurs mesurées sont plus faibles que pour les essais avec de l'eau.

Les Figures 3-17c et 3-17d présentent la variation du couple pour les essais avec le dislocateur poche profonde en combinaison avec de l'eau et l'huile ISO VG 46. Globalement, le couple augmente avec la vitesse de rotation ; pour les essais avec l'huile on peut observer une croissance du couple plus significative que pour les essais avec de l'eau. De plus, dû probablement à la viscosité plus importante de l'huile, le couple est plus grand. On précise ici que pour les essais avec de l'eau et pour les épaisseurs de mousse supérieures à 1,4 mm, le couple, très faible, n'est pas présenté sur la Figure 3-17c. En faisant la comparaison des couples mesurés pour les essais avec le dislocateur initial et le dislocateur poche profonde, nous pouvons constater que ce dernier produit un couple plus faible que celui obtenu avec le dislocateur initial. Cette différence est notamment très significative pour les essais réalisés avec de l'eau.

Ce phénomène est déterminé par les géométries différentes des dislocateurs. Comme nous l'avons précisé auparavant, le dislocateur initial a une surface plane horizontale plus importante que le dislocateur poche profonde. En s'intéressant aux Figures 3-16d et 3-16e, nous pouvons de plus remarquer que la section du bord d'attaque du dislocateur initial est plus grande que celle du dislocateur à poche profonde (on précise ici que, bien que la surface de la paroi arrière de la poche profonde soit beaucoup plus importante que celle du dislocateur initial, elle ne participe pas dans la phase initiale de la compression de mousse). Autrement dit, le dislocateur initial a une traînée plus importante que le dislocateur poche profonde.

Les résultats expérimentaux représentant la variation du couple pour les essais avec le dislocateur plan incliné en combinaison avec de l'eau et l'huile ISO VG 46 sont présentés sur les Figures 3-17e et 3-17f. En analysant ces graphes, nous pouvons noter que le couple augmente avec la vitesse de rotation dans les deux cas et avec un taux de croissance plus important pour l'huile. En faisant l'analyse comparative des essais à l'eau, nous pouvons constater que le dislocateur plan incliné produit un couple plus faible que le dislocateur initial et un couple plus important que dans le cas du dislocateur poche profonde. Concernant les essais à l'huile ISO VG 46, le couple du dislocateur plan incliné est légèrement plus important que celui produit par le dislocateur initial et presque deux fois plus grand que celui du dislocateur poche profonde. En effet, le bord d'attaque pour le dislocateur plan incliné a une particularité qui est présentée schématiquement sur les Figures 3-16c et 3-16f. Ainsi la surface du bord d'attaque n'est pas constante, mais elle dépend de l'épaisseur de la mousse. Pour les épaisseurs importantes la traînée du dislocateur est déterminée par le congé du patin. Au fur et à mesure que l'épaisseur de la mousse diminue, la partie plus importante de la surface inclinée du patin entre en contact avec la mousse et donc augmente la surface du bord d'attaque.

En s'appuyant sur les analyses des résultats expérimentaux de cette troisième catégorie d'essais, nous pouvons conclure que, parmi les cas étudiés, le dislocateur plan incliné présente la géométrie la plus adaptée aux applications de la lubrification XPHD en termes de génération de pression, tout en ayant un niveau de couple acceptable.

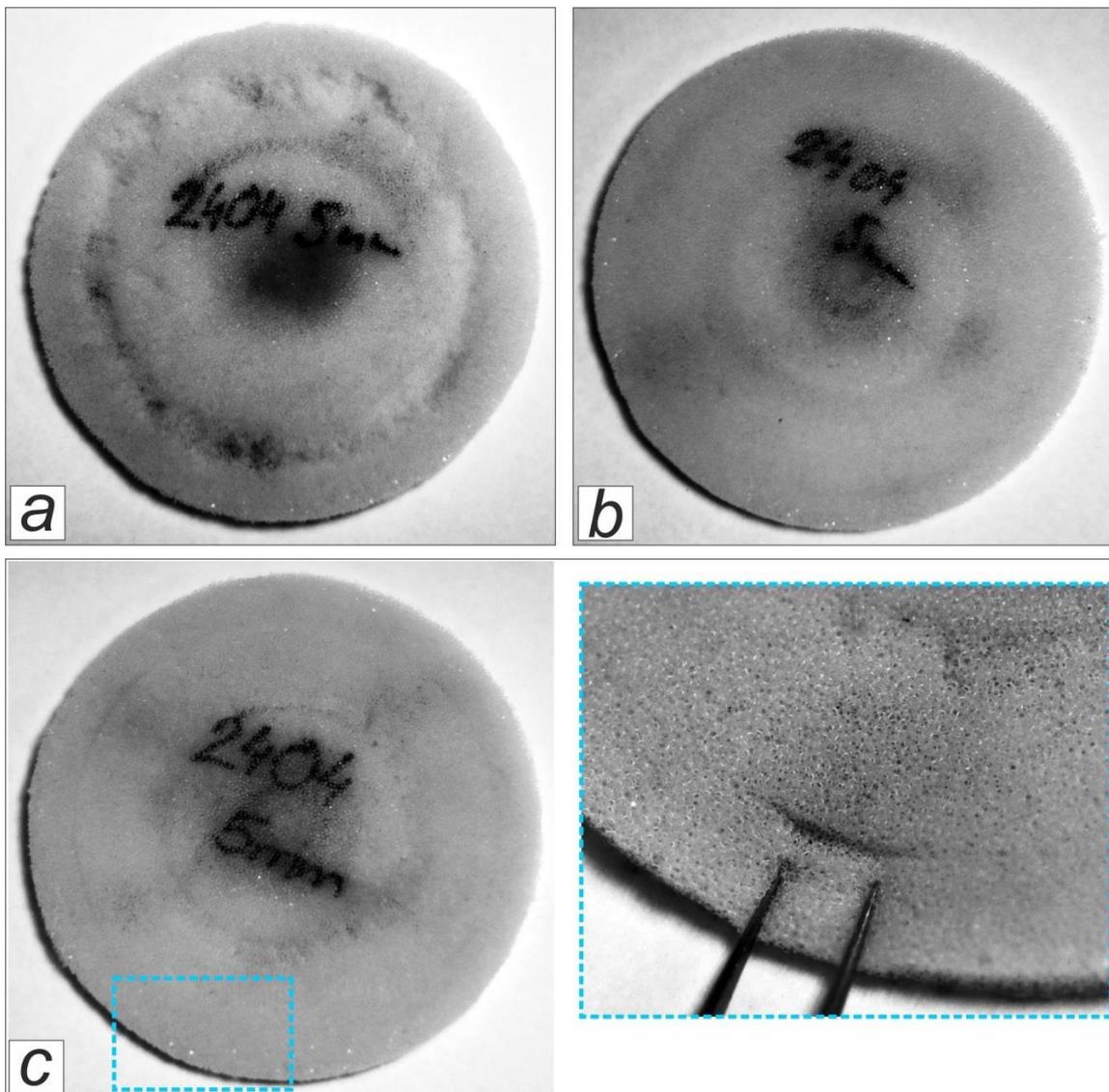


**Figure 3-17.** Résultats des essais (Couple=f(V)) en mode géométrie imposée avec l'eau et l'huile ISO VG 46 [ $h_1=1,2$  mm correspond à  $\varepsilon=0,83$ ] : a, b) dislocateur initial, c, d) dislocateur poche profonde, e, f) dislocateur plan incliné.

### III.3.4. Résultats expérimentaux: usure de la mousse

Dans le cadre des essais en mode «géométrie imposée» avec les trois types de dislocateurs, il nous parut intéressant d'investiguer l'impact de chaque dislocateur sur la structure de l'échantillon étudié et donc de s'intéresser à l'usure de la mousse pour les applications XPHD. Notamment, l'analyse d'usure fut réalisée pour les mousses imbibées à l'eau et l'huile ISO VG 46.

Pour les essais avec de l'eau, un échantillon de mousse neuf fut fixé sur le grain mobile avant la première série d'essais pour chaque type de dislocateur. Par la suite, les échantillons de la mousse furent inspectés pour détecter la présence des usures éventuelles après chaque campagne d'essais. Les photographies des échantillons de mousse après les essais (avec de l'eau) pour les trois dislocateurs sont présentées ci-dessous sur la Figure 3-18.

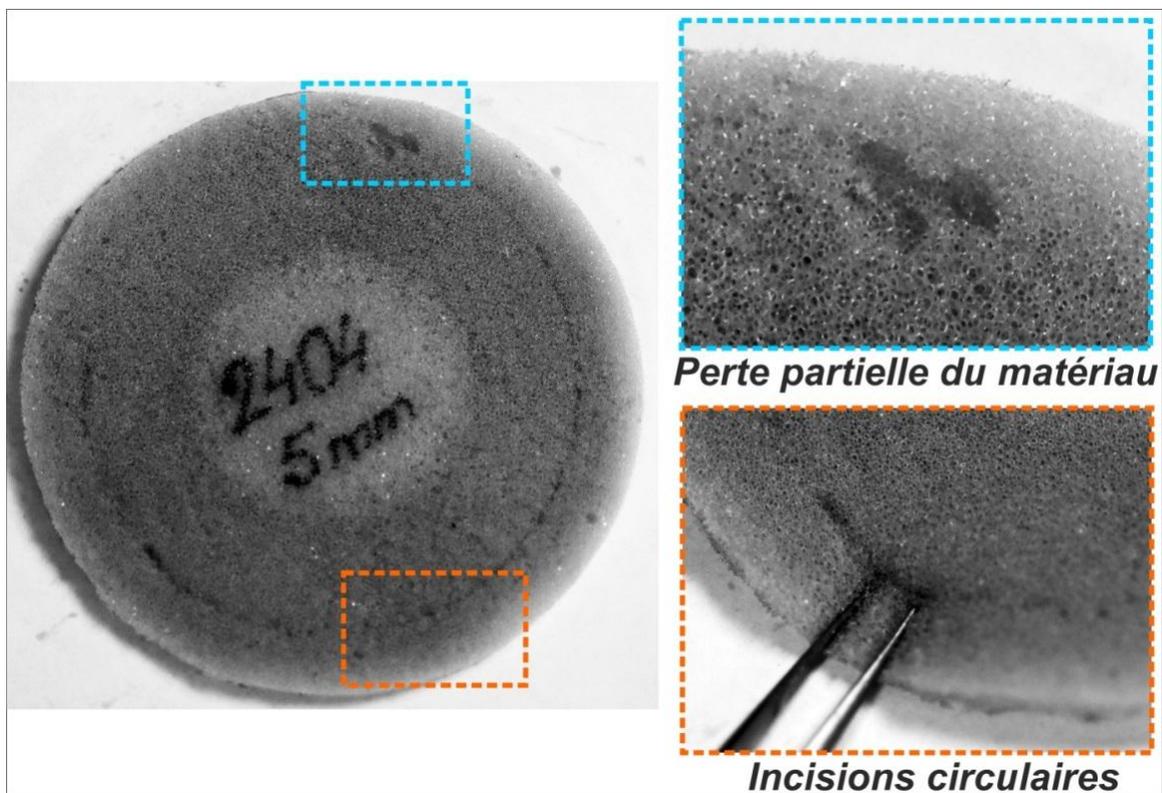


**Figure 3-18.** Usure de la mousse après les essais réalisés avec de l'eau et différents dislocateurs :  
a) dislocateur initial, b) dislocateur poche profonde, c) dislocateur plan incliné.

En s'appuyant sur ces photographies, nous pouvons voir que l'usure de la mousse dépend de la géométrie du dislocateur utilisé. Notamment, chaque dislocateur laisse des traces d'usures caractéristiques. Ainsi, l'utilisation du dislocateur initial provoque une perte significative du matériau de la mousse dans la zone du passage des patins (dans ce cas la largeur de la zone d'usure correspond à la largeur de la poche (Figure 3-18a)).

Quant au dislocateur avec la poche profonde, on remarque sur la Figure 3-18b que son impact est beaucoup moins significatif : on note une faible usure uniforme de la mousse dans la zone du contact représentée par un léger écrasement de la mousse.

L'usure de la mousse après les essais avec le dislocateur plan incliné en combinaison avec de l'eau présente deux incisions circulaires (Figure 3-18c) qui forment un anneau circulaire de largeur équivalente à celle du patin du dislocateur. Malgré ces incisions circulaires, le dislocateur plan incliné ne détruit pas la surface de la mousse (on rappelle ici que ce dislocateur permet de générer des niveaux de pression supérieurs aux deux autres dislocateurs).



**Figure 3-19.** Usure de la mousse après les essais avec l'huile ISO VG 46.

Concernant l'analyse d'usures de la mousse imbibée à l'huile ISO VG 46, nous précisons que seul un échantillon de mousse fut investigué et que cet échantillon subit trois séries d'essais avec chaque type de dislocateur (donc au total neuf séries d'essais) plus des essais d'endurance. Ce dernier type d'essai fut réalisé sur une période de 72 heures en continu avec le dislocateur plan incliné, et l'échantillon de mousse comprimé à 1,3 mm. Pour éviter un échange thermique entre l'huile et l'air ambiant tout au long des essais, le banc d'essais fut équipé d'une isolation thermique. La photographie de l'échantillon de mousse après les essais avec de l'huile ISO VG 46 est présentée sur la Figure 3-19. Nous pouvons observer deux

types d'usures : une perte partielle du matériau et des incisions circulaires dues d'abord à l'interaction avec le dislocateur initial puis avec le dislocateur plan incliné respectivement. Néanmoins, malgré le nombre d'essais importants réalisés avec cet échantillon, nous pouvons remarquer que le niveau d'usure de la mousse est beaucoup moins important avec l'huile ISO VG 46 qu'avec l'eau.

En se basant sur les résultats de cette étude, on peut donc dire que la durée de vie des matériaux poreux dans les applications XPHD est déterminée non seulement par la forme géométrique du dislocateur, mais aussi par les propriétés des lubrifiants utilisés.

### III.4. Modèle de lubrification XPHD

Le modèle de lubrification XPHD se base sur une équation de type Reynolds, développée à partir de l'équation de Darcy-Brinkman (présentée déjà dans la bibliographie et dans l'étude de la perméabilité) et de l'équation de continuité. Le développement présenté ci-dessous prend en compte les principales hypothèses de la lubrification :

- ❖ le milieu fluide est continu ;
- ❖ l'écoulement est laminaire ;
- ❖ le fluide est newtonien (la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement) ;
- ❖ les forces massiques extérieures et les forces d'inertie sont négligeables ;
- ❖ il n'y a pas de glissement entre le fluide et les parois du contact ;
- ❖ la pression est constante suivant l'épaisseur du milieu.

Pour une meilleure compréhension du développement de notre modèle de lubrification XPHD, une illustration associée à notre étude est présentée sur la Figure 3-20. Nous considérons deux surfaces, correspondant au dislocateur et au support rigide, séparées par un milieu poreux imbibé. Un système d'axes de référence orthonormé  $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  est choisi de sorte que la direction  $\vec{y}$  corresponde à la direction suivant l'épaisseur de film. On fait aussi l'hypothèse (forte) que entre le dislocateur et le milieu, ainsi que entre le support rigide est le milieu il n'y a pas de jeu ou de fluide : le milieu poreux, très souple, suit la géométrie du dislocateur.

Le développement du modèle est présenté pour le cas unidimensionnel. Ainsi, l'équation de Darcy-Brinkman peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{\phi}u + \mu' \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (3.1)$$

avec  $\mu' = \frac{\mu}{\varepsilon}$  la viscosité effective.

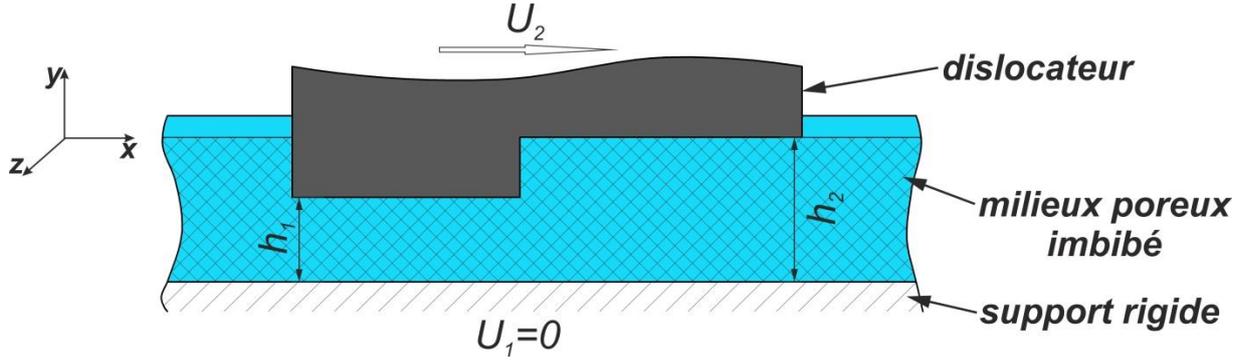


Figure 3-20. Système d'axes et éléments constituant du système XPHD.

La solution générale de l'équation différentielle à coefficients constants (3.1) est présentée ci-dessous :

$$u(y) = A \sinh(\omega y) + B \cosh(\omega y) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (3.2)$$

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\frac{\mu}{\mu' \phi}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\phi}}.$$

$$\text{Les conditions aux limites sont : } u(y=0) = U_1 = 0 \text{ et } u(y=h) = U_2. \quad (3.3)$$

Ici  $h$  correspond à la distance entre le support rigide et le dislocateur. En appliquant les conditions aux limites, nous pouvons déterminer les coefficients  $A$  et  $B$  dans l'équation (3.2) :

$$\text{à } y=0 : \quad U_1 = B - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \Rightarrow B = \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{à } y=h : \quad U_2 &= A \sinh(\omega h) + B \cosh(\omega h) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \\ &= A \sinh(\omega h) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \cosh(\omega h) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Rightarrow \\ \Rightarrow A &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} + \frac{U_2}{\sinh(\omega h)}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

En remplaçant les coefficients  $A$  et  $B$  par les expressions (3.4) et (3.5), l'équation (3.2) prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} u(y) &= \left( \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} + \frac{U_2}{\sinh(\omega h)} \right) \sinh(\omega y) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \cosh(\omega y) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Rightarrow \\ \Rightarrow u(y) &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\sinh(\omega y)}{\sinh(\omega h)} - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \sinh(\omega y) + U_2 \frac{\sinh(\omega y)}{\sinh(\omega h)} + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \cosh(\omega y) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

L'équation de conservation de la masse s'écrit comme suit :

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy + \int_0^h \frac{\partial v}{\partial y} dy = 0 \Leftrightarrow \int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy + V = 0, \quad (3.7)$$

où  $V = \frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + U_2 \frac{\partial h}{\partial x}$ . En considérant le cas stationnaire (i.e. le déplacement du patin suivant l'axe Oy est nul) nous pouvons écrire :

$$V = \frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + U_2 \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = -U_2 \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (3.8)$$

Par ailleurs :  $\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u(y) dy - U_2 \frac{\partial h}{\partial x}$ . (3.9)

Pour déterminer le premier terme de droite de l'équation (3.9) on intègre l'équation de la vitesse (3.6) [le développement complet de cette intégration est donné en Annexe 5] :

$$\begin{aligned} \int_0^h u(y) dy &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy + \\ &+ U_2 \frac{1}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h \cosh(\omega y) dy - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h dy \Rightarrow \\ \Rightarrow \int_0^h u(y) dy &= -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( 2 \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} + h \right) + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

En introduisant le coefficient  $C = \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)}$  on peut récrire l'équation (3.10) comme suit :

$$\int_0^h u(y) dy = -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h - 2C) + U_2 C. \quad (3.11)$$

Alors :

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\phi}{\mu} (h - 2C) \frac{\partial p}{\partial x} \right) + U_2 \frac{\partial C}{\partial x} + U_2 \frac{\partial h}{\partial x} = 0. \quad (3.12)$$

Par la suite l'équation des films minces modifiée prend la forme ci-dessous :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\phi}{\mu} (h - 2C) \frac{\partial p}{\partial x} \right) = U_2 \frac{\partial C}{\partial x} - U_2 \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (3.13)$$

Cette équation peut être généralisée en forme 2D :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\phi}{\mu} (h - 2C) \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\phi}{\mu} (h - 2C) \frac{\partial p}{\partial z} \right) = U_2 \frac{\partial C}{\partial x} - U_2 \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (3.14)$$

### III.5. Validation du modèle de lubrification XPHD par comparaison avec un modèle CFD

Comme nous l'avons précisé au début du paragraphe précédent, le modèle de lubrification XPHD est basé sur un certain nombre d'hypothèses qui sont habituellement utilisées pour décrire les écoulements en films minces, mais ne sont pas vraiment validées pour les écoulements à l'intérieur des milieux poreux. Afin de vérifier la validité de notre modèle, ce paragraphe présente une comparaison avec des résultats obtenus par un logiciel commercial (Abaqus) permettant des calculs CFD à travers des milieux poreux. Le modèle implémenté dans ce logiciel est très général : il est basé sur l'équation (3.15) qui représente une combinaison entre les modèles de Darcy-Brinkman-Forchheimer :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla \left( \frac{u}{\varepsilon} \right) \right) = -\nabla p + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 u - \frac{\mu}{\phi} u - \frac{\rho C_f}{\sqrt{\phi}} |u|u . \quad (3.15)$$

Dans le chapitre bibliographique, nous soulignâmes le fait que l'équation (3.15) n'a pas de validation expérimentale, mais qu'elle représente plutôt une analogie à l'équation de Navier-Stokes. Pour cette raison, mais aussi dû au fait que le modèle de lubrification développé ne prend pas en compte les effets dits «de Forchheimer», les modélisations CFD présentées ci-dessous ont été réalisées avec un coefficient de Forchheimer  $C_f = 0$ .

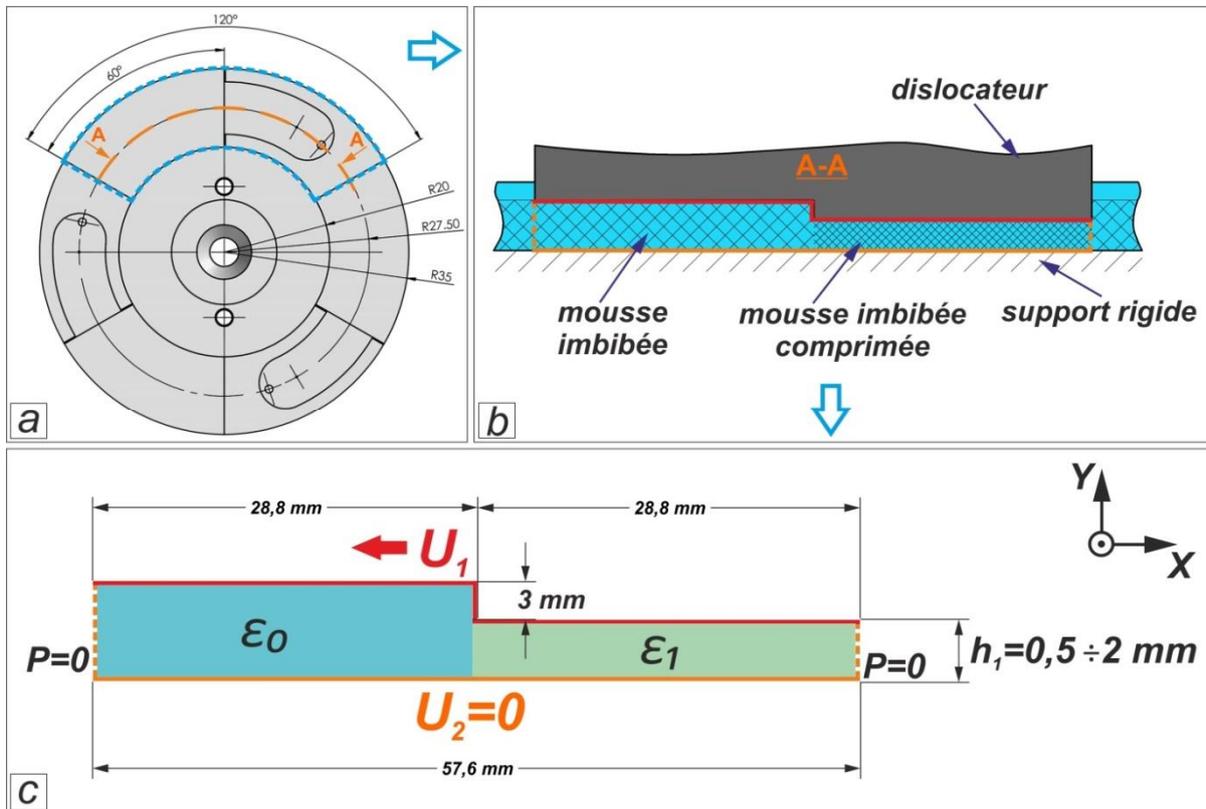
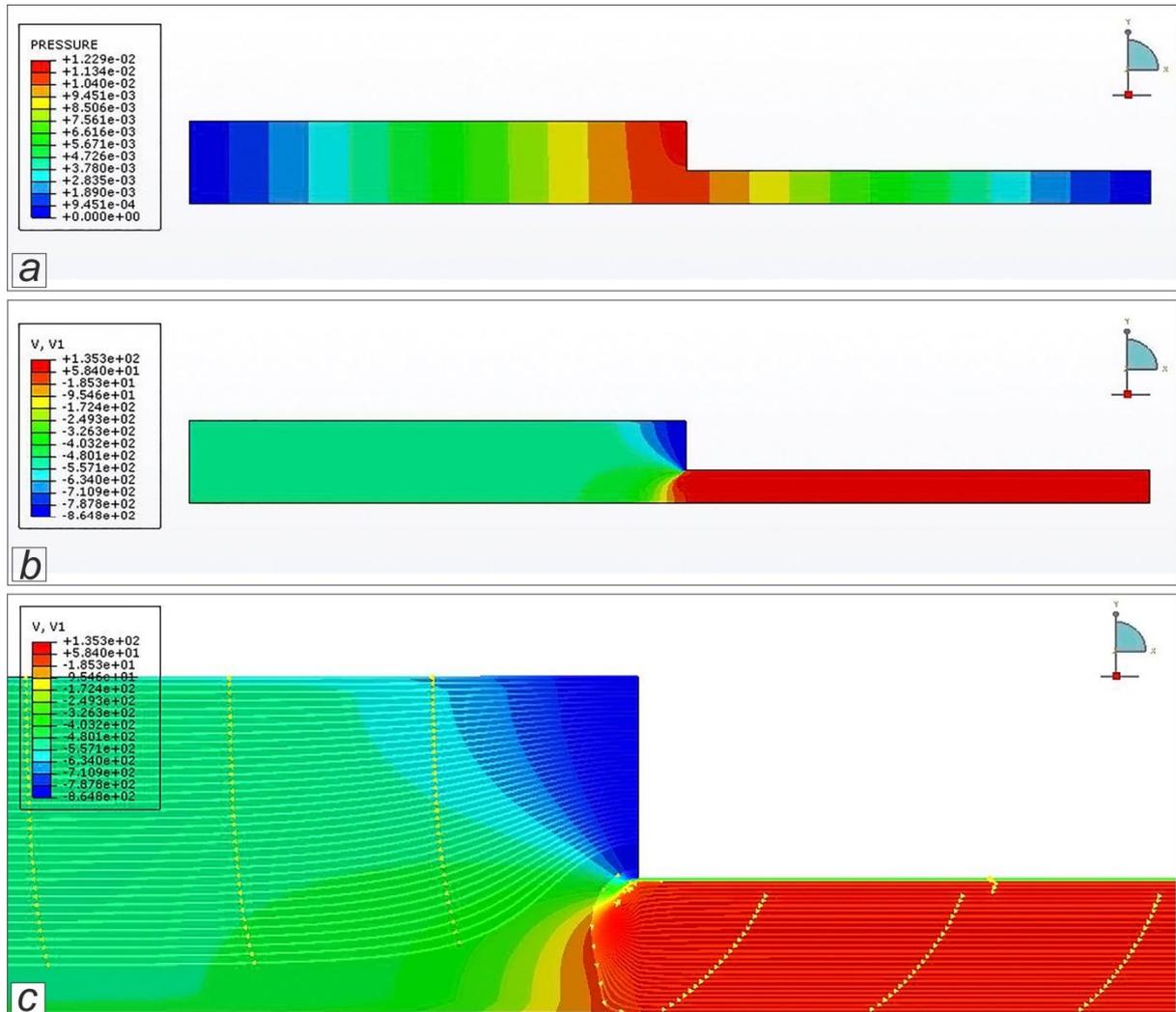


Figure 3-21. Schéma du modèle Abaqus : a, b) coupe développée d'un patin suivant le rayon moyen, c) domaine d'étude du modèle (la poche est omise).

Les calculs sont réalisés pour le cas unidimensionnel. La géométrie du domaine de calcul est la plus proche possible de la géométrie du dislocateur initial testé sur le banc d'essais (Figure 3-21).

À titre d'exemple, la Figure 3-22 présente des résultats de modélisation CFD pour un cas correspondant à la vitesse linéaire de 864 mm/s (vitesse de rotation de butée de 300 tr/min) et à l'épaisseur de la mousse comprimée ( $h_1$ ) égale 2 mm (pour d'autres cas la variation des paramètres a une tendance similaire).



**Figure 3-22.** Visualisation des résultats de modélisation avec le modèle CFD (vitesse linéaire de 864 mm/s,  $h_1=2$  mm) : a) variation de la pression, b) variation de la vitesse de lubrifiant suivant  $\vec{x}$ , c) lignes de courant.

Nous pouvons noter que, sauf pour la zone de changement brusque d'épaisseur, la pression est constante suivant l'épaisseur de la mousse. Concernant les vitesses du lubrifiant pour la zone de faible épaisseur, on note que le déplacement du dislocateur entraîne le fluide vers  $\vec{x}$  positif, direction contraire au déplacement de la paroi supérieure. Pour la zone d'épaisseur importante, le fluide est poussé vers  $\vec{x}$  négatif. En effet, et contrairement à la lubrification classique, le déplacement du fluide à l'intérieur de la structure poreuse n'est pas dû à l'effet de Couette (entraînement du fluide par adhérence à la paroi mobile) mais surtout à l'écrasement de la structure généré par le mouvement du dislocateur. Autrement dit, pour

généraler de la pression, le dislocateur doit avoir un mouvement relatif par rapport au milieu poreux : dans le cas étudié, si le dislocateur est immobile mais qu'une vitesse est appliquée à la surface inférieure, la génération de la pression est presque nulle (ou complètement nulle si le terme de Brinkman dans l'équation (3.15) n'est pas pris en compte).

La figure 3-23 montre des comparaisons entre les variations de la pression obtenues avec le modèle CFD et avec le modèle de lubrification XPHD. La corrélation est bonne, sauf au niveau de la discontinuité de l'épaisseur de film. En effet, comme on peut l'observer aussi sur la Figure 3-23a, la variation brusque de la géométrie conduit à des effets inertiels locaux qui ne peuvent pas être pris en compte par notre modèle XPHD. Cependant, même pour le cas le plus défavorable (Figure 3-23c) les différences restent négligeables et très localisées.

On peut donc en conclure que le modèle de lubrification XPHD présenté dans ce chapitre est validé, au moins pour les conditions de fonctionnement testées au long de cette thèse.

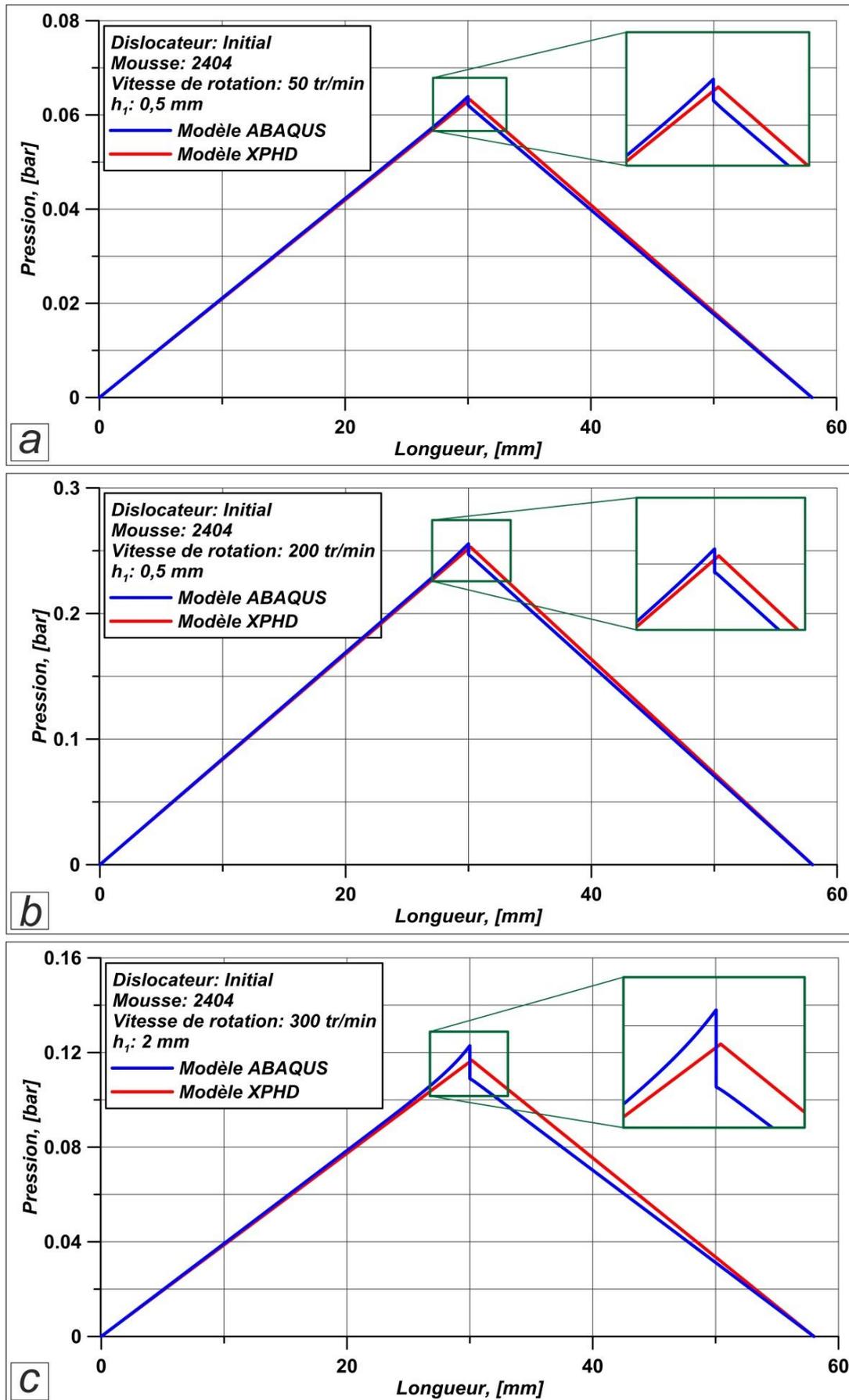


Figure 3-24. Comparaison des résultats de modélisation avec modèle Abaqus et le modèle XPHD.

## III.6. Comparaison des résultats expérimentaux avec la modélisation

L'analyse comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques est focalisée sur la dernière campagne d'essais, présentés dans le chapitre III.3.3. Des calculs furent réalisés pour les conditions correspondant à un mode de fonctionnement en «géométrie imposée» et pour trois types de dislocateur (initial, poche profonde et plan incliné).

La Figure 3-25 montre des comparaisons obtenues pour les trois types de dislocateur avec un milieu poreux imbibé avec de l'eau. Pour chaque géométrie, l'influence de la perméabilité sur les résultats numériques fut étudiée (on rappelle ici qu'au chapitre II.3.2.3 nous montrâmes que la perméabilité déterminée pour la même mousse peut varier fortement avec le vieillissement du matériau). Ainsi, deux valeurs de la perméabilité (présentées sur la Figure 2-28a) furent utilisées pour effectuer les calculs.

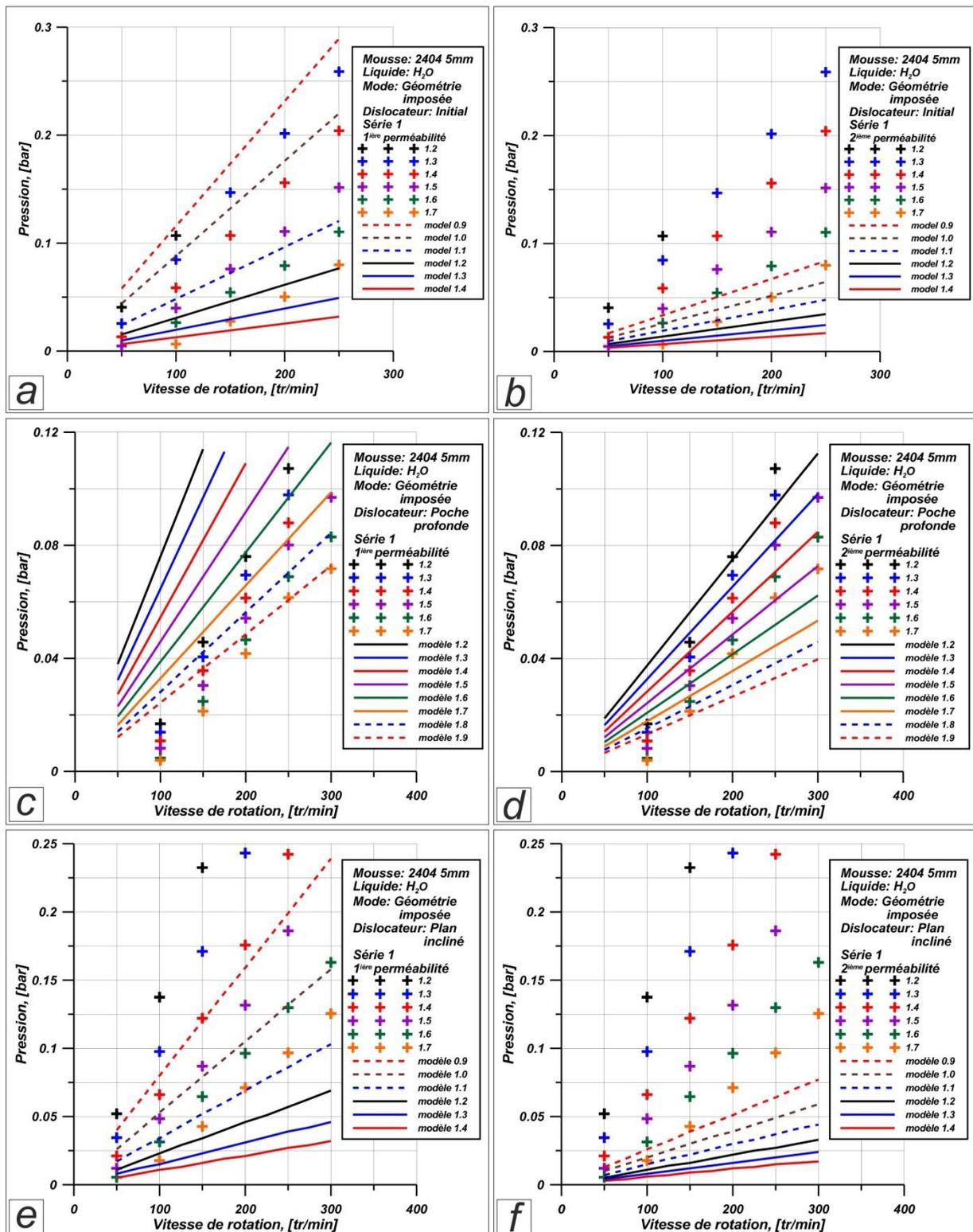
Les Figures 3-25a et 3-25b montrent la comparaison expérimentale/numérique pour le dislocateur initial. Premièrement, on peut noter que le modèle numérique a tendance à sous-estimer les valeurs de pression. Pour obtenir une bonne corrélation, il faut augmenter artificiellement le taux de compression de la mousse (les lignes pointillées sur les figures furent obtenues avec des taux de compression non-testés expérimentalement). Logiquement, les pressions prédites pour la 2<sup>ème</sup> perméabilité sont plus faibles car, de manière générale, il y a presque un facteur deux entre les valeurs déterminées expérimentalement. Les mêmes tendances sont obtenues pour le dislocateur plan incliné (Figures 3-25e et 3-25f) : les pressions données par le modèle sont plus petites que celles mesurées. Pour le dislocateur à poche profonde (Figures 3-25c et 3-25d) la tendance est inversée : le modèle tend à surestimer les valeurs de la pression.

Globalement, on note aussi que le taux de variation de la pression avec la vitesse de rotation est différent entre les mesures et les prédictions numériques : pour les trois géométries de dislocateur, le taux de variation de la pression mesurée est plus grand que celui prédit par le modèle numérique.

Les résultats expérimentaux montrent que le dislocateur à plan incliné est le meilleur de point de vue de la pression générée. Le dislocateur initial prend la place intermédiaire, tandis que le dislocateur à poche profonde ferme ce classement de performance.

Cependant, selon les résultats de la modélisation numérique il peut sembler que le dislocateur à poche profonde permet de générer la pression la plus importante par rapport aux deux autres types de dislocateur.

La différence entre les résultats expérimentaux et numériques peut être générée par des approximations du taux de compression imposé expérimentalement (les valeurs affichées peuvent être influencées par une erreur allant jusqu'à 0,2 mm). Cependant, il est évident que le modèle numérique ne prend pas en compte l'ensemble des phénomènes physiques intervenant lors de la lubrification XPHD.



**Figure 3-25.** Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de modélisation [mode «géométrie imposée», lubrifiant : eau] pour trois types de dislocateur : a, b) dislocateur initial, c, d) dislocateur poche profonde, e, f) dislocateur plan incliné.

Notamment, l'hypothèse supposant un contact parfait (sans jeu) entre le dislocateur et le milieu poreux n'est sans doute pas respectée en réalité, surtout au niveau des changements brusques de géométrie. L'apparition d'un jeu peut alors provoquer l'écoulement du fluide entre le dislocateur et milieu poreux (Figure 3-26). Dans ce cas, il est évident que cet effet va jouer un rôle non-négligeable dans le fonctionnement du système de lubrification XPHD.

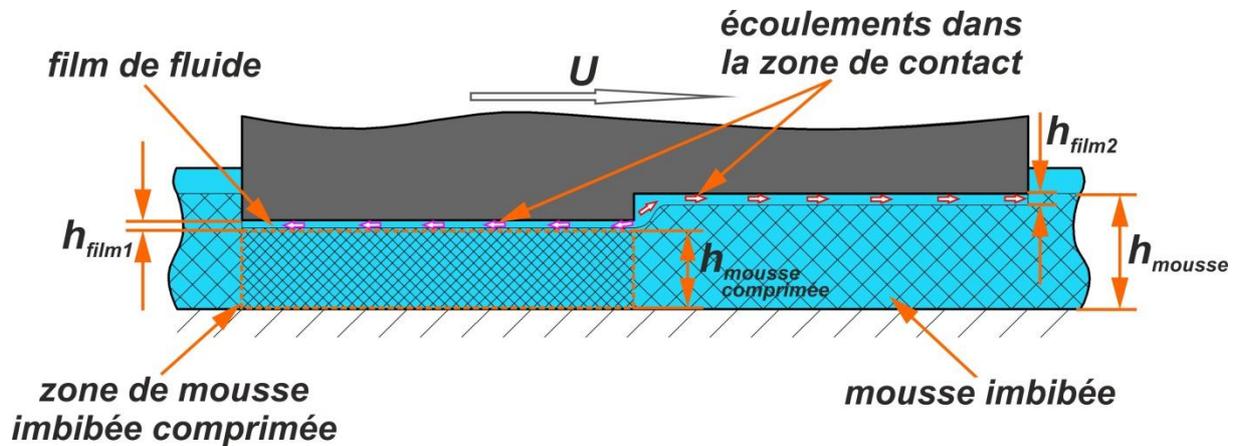


Figure 3-26. Schéma du contact entre le dislocateur et le milieu poreux.

Des comparaisons expérimental/numérique furent aussi réalisées pour les trois géométries de dislocateur mais en lubrifiant le système avec l'huile ISO VG 46 (Figure 3-27). Comme pour le cas lubrifié à l'eau, numériquement, on obtient des résultats contradictoires avec les mesures expérimentales : le dislocateur à poche profonde permet de générer des pressions supérieures par rapport au dislocateur initial et même par rapport au dislocateur plan incliné. La comparaison stricte des pressions montre que, pour les trois géométries, le modèle surestime les valeurs. Comme déjà fut expliqué dans les paragraphes précédents, la viscosité relativement importante de l'huile peut conduire à des problèmes de ré-imbibition de la mousse, non considérés par la modélisation numérique.

Cette étude comparative montre que la modélisation correcte du mécanisme de lubrification XPHD ne peut pas être réalisée qu'en utilisant la loi d'écoulement dans un milieu poreux saturé de lubrifiant. De notre point de vue, il est nécessaire de prendre en compte la présence du lubrifiant entre le dislocateur et le milieu poreux, de la coupler avec une modélisation réaliste du milieu déformé, ce qui nous donnera une bonne approximation de la géométrie du domaine de calcul.

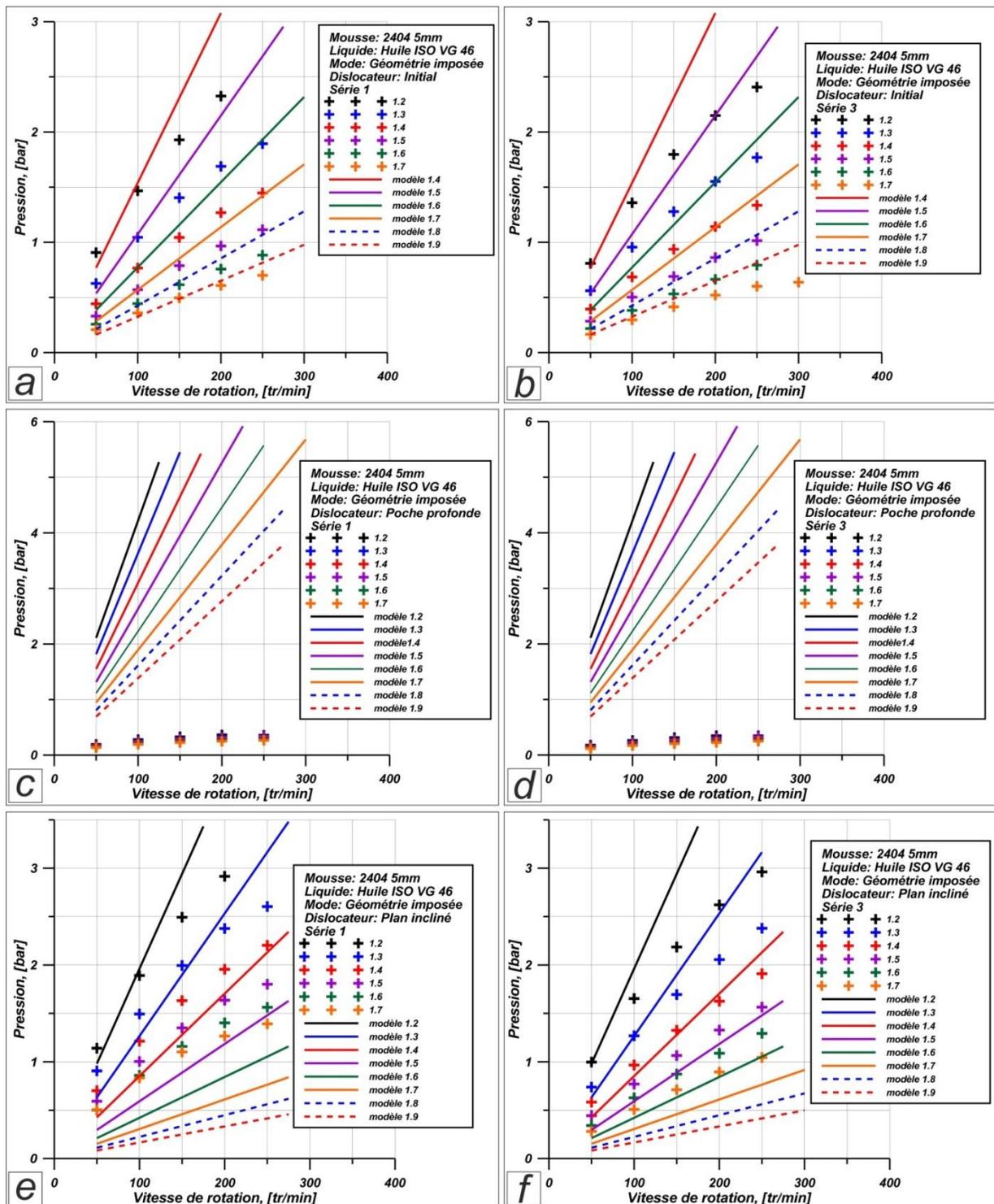


Figure 3-27. Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de modélisation [mode «géométrie imposée», lubrifiant : huile ISO VG 46] pour trois types de dislocateur : a, b) dislocateur initial, c, d) dislocateur poche profonde, e, f) dislocateur plan incliné.

## IV. Conclusions et perspectives

Le mécanisme de lubrification XPHD présente un sujet de recherche innovant inter- et multidisciplinaire. Les phénomènes physiques sous-jacents à ce type de lubrification sont assez vastes et complexes, nécessitant des études approfondies. Pour notre équipe de recherche «Tribolub», ce travail présente une étude pionnière qui permet d'ouvrir de nouvelles frontières dans le domaine du contact lubrifié.

Dans ce contexte, le mémoire s'attacha à l'étude des performances de la lubrification XPHD dans le cadre d'un mouvement tangentiel, à faible et moyenne vitesses de rotation.

Premièrement, à travers des recherches bibliographiques, nous pûmes voir que la majorité des travaux existants furent abordés dans des contextes autres que celui de la lubrification XPHD. Les travaux spécialement focalisés sur ce sujet sont très peu couverts par la littérature scientifique existante.

En s'appuyant sur les aspects théoriques présentés dans l'étude bibliographique, une partie de ce travail de recherche fut focalisée sur l'identification des matériaux-candidats poreux, représentant l'un des objectifs principaux de cette thèse. Ainsi, la mousse de polyuréthane fut choisie en tant que candidat potentiel en raison de son accessibilité et de la possibilité d'évaluer relativement aisément les performances de la lubrification XPHD.

Pour la caractérisation des milieux poreux à structure très souple, de nouveaux dispositifs expérimentaux furent conçus : perméamètres longitudinal et axisymétrique, dispositifs de visualisation. Dans le même but, les dispositifs existants furent spécialement modifiés : adaptation de la machine d'essais mécaniques et du tomographe.

Grâce à cette étape de caractérisation, nous pûmes déterminer les paramètres essentiels pour la lubrification XPHD : la porosité et la perméabilité de la mousse, ainsi que ses propriétés mécaniques et géométriques. En même temps, cette étude met en évidence les difficultés rencontrées durant la caractérisation des matériaux poreux.

On note que les principales propriétés déterminées expérimentalement présentent une dispersion importante provoquée par la structure complexe du matériau, ainsi que par la présence de pores demi- ou quasi fermés qui ont une influence significative sur l'écoulement et donc sur la porosité et la perméabilité des mousses étudiées. Nous pûmes constater que la structure du matériau poreux mais aussi les propriétés physiques des liquides utilisés, pouvaient influencer les mesures des paramètres caractéristiques. En particulier, les mesures avec le perméamètre longitudinal montrèrent que les perméabilités de la mousse mesurées à l'eau et à l'huile sont différentes.

Quant à l'étude de la porosité de mousse, elle nous montra que la méthode de mesures par tomographie à rayons X est la plus précise et donc préférable à celle basée sur l'imbibition du milieu. Cependant, grâce à cette deuxième méthode, nous pûmes voir l'influence du liquide utilisé sur le mécanisme d'imbibition de la mousse : la mousse s'imbibe plus facilement avec de l'eau qu'avec de l'huile en raison de la viscosité moins importante de l'eau par rapport à celle de l'huile.

L'étude de caractérisation des matériaux poreux ouvre également la voie à plusieurs perspectives. Parmi celles-ci, nous pouvons citer : avoir une meilleure compréhension des dispersions de mesure de la perméabilité ; réaliser des comparaisons des perméabilités

obtenues avec les perméamètres longitudinal et circulaire (le schéma de ce dernier est donné en Annexe 6) ; ainsi que de nouvelles campagnes d'essais pour d'autres lubrifiants.

La recherche des nouveaux matériaux poreux, plus adaptés pour les applications de la lubrification XPHD, reste toujours un objectif important. L'utilisation du tomographe à rayons X donne un grand potentiel dans ce domaine : cette technique permet d'étudier la structure des matériaux poreux pour différents taux de compression et donc de déterminer la porosité correspondante à chaque phase de compression.

Une autre perspective intéressante et innovante sera la création d'un «perméamètre numérique». L'idée essentielle consiste à générer un matériau poreux numérique avec des paramètres stochastiques (rayons et distribution des pores) semblables (ou non) aux mesures sur tomographe. Ainsi, à l'aide des outils de calcul CFD, nous pourrions étudier l'écoulement à travers ce matériau afin de déterminer sa perméabilité.

Une autre grande partie de ce travail de recherche est consacrée à l'étude expérimentale et numérique de la lubrification XPHD.

Un dispositif d'essais de type «butée» fut spécialement développé pour étudier les performances de la lubrification XPHD. Cette installation permet la réalisation d'investigations expérimentales en mode géométrie ou charge imposée, pour des vitesses de rotation allant jusqu'à environ 340 tr/min.

Les résultats des essais confirmèrent la capacité d'un système basé sur le mécanisme de la lubrification XPHD de fonctionner sous une charge donnée pour de faibles et moyennes vitesses de rotation. Nous mîmes en évidence que les performances du système sont fortement dépendantes du lubrifiant utilisé, de la capacité de ré-imbibition de la mousse et de la géométrie du dislocateur. Dans le cas général, la pression générée par le système a tendance à augmenter avec la vitesse de rotation et avec la diminution de l'épaisseur de la mousse. Cependant, un taux de compression trop important du milieu poreux peut entraîner un écrasement complet des pores (ou dans le cas le plus critique, la destruction irréversible de la mousse) et par conséquent une chute significative de la pression générée.

Trois géométries de dislocateur furent testées : un plan incliné et deux géométries avec des poches de profondeur différentes. Les essais furent réalisés pour deux lubrifiants : l'eau et l'huile ISO VG 46. Le dislocateur plan incliné montra les meilleures performances et donc fut retenu comme le plus adapté aux applications XPHD.

Cette étude expérimentale ouvre une large palette de perspectives à court et moyen terme. Premièrement, il est nécessaire d'améliorer le réglage du banc d'essais afin d'éviter au maximum les erreurs au niveau des mesures de l'épaisseur de la mousse durant les essais. Les nouvelles campagnes d'essais pourront servir à l'étude des performances de combinaisons de nouveaux liquides et matériaux poreux. On peut également mentionner ici le développement en cours d'un dispositif de visualisation qui permet d'étudier l'interaction de l'ensemble «dislocateur-liquide-milieu poreux».

Dans le but d'étudier le mécanisme de lubrification XPHD pour des vitesses de rotation et une charge plus importante, le banc d'essais «Butées» déjà existant au laboratoire est en cours d'adaptation. Malheureusement, la modification et l'adaptation du banc d'essais ne furent terminées qu'au mois de février 2018 ne permettant pas de présenter les résultats des

premiers essais dans ce mémoire (le dessin du dislocateur utilisé durant ces essais est fourni en Annexe 7).

Un modèle de lubrification XPHD fut aussi développé. Il propose une équation de type Reynolds, développée à partir de l'équation de Darcy-Brinkman et de l'équation de continuité. La vérification du modèle XPHD, pour les conditions de fonctionnement testées, fut effectuée avec le module CFD du logiciel commercial Abaqus.

Les comparaisons des résultats de modélisation furent réalisées avec des résultats d'essais en mode «géométrie imposée» pour trois types de dislocateur. L'ensemble de ces comparaisons montre qu'une amélioration de la modélisation numérique est nécessaire. En particulier, il sera important d'introduire des conditions aux limites plus adaptées au niveau du contact dislocateur/milieu poreux ainsi que de prendre en compte l'écoulement du lubrifiant entre le milieu et le dislocateur. Un autre aspect important, qui n'est pas considéré par notre modèle numérique, est l'effet de ré-imbibition qui semble jouer un rôle primordial dans ce mécanisme de lubrification.

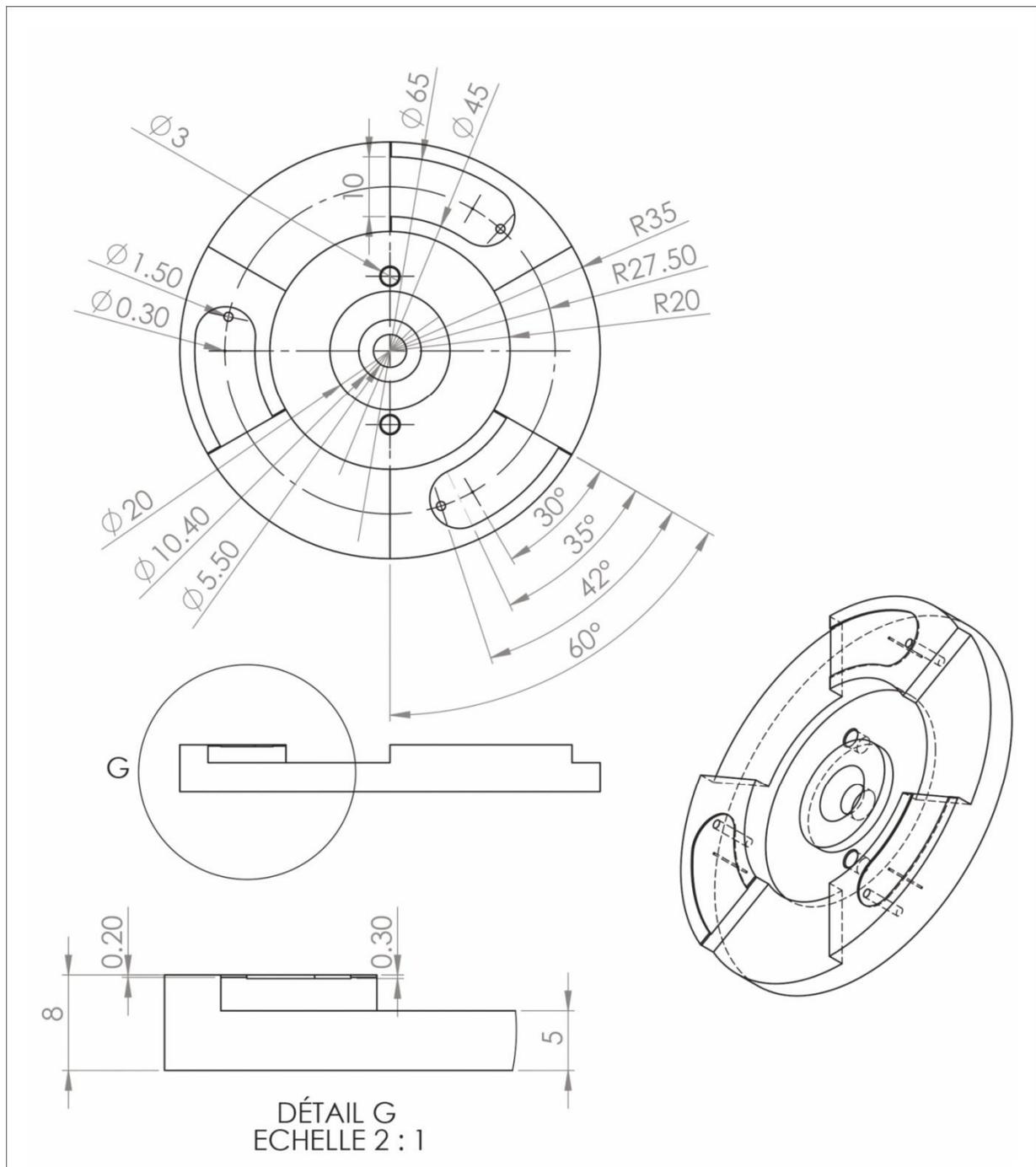


# Nomenclature

$\varepsilon$  – porosité  
 $\varepsilon_s$  – porosité surfacique  
 $\phi$  – perméabilité [ $L^2$ ]  
 $c$  – compacité  
 $\tau$  – tortuosité  
 $\mu$  – viscosité dynamique [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]  
 $\mu'$  – viscosité dynamique effective [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]  
 $\rho$  – masse volumique [ $ML^{-3}$ ]  
 $R'_e$  – nombre de Reynolds modifié  
 $V_p$  – volume des pores [ $L^3$ ]  
 $V_s$  – volume de solide [ $L^3$ ]  
 $V_t$  – volume total [ $L^3$ ]  
 $A_p$  – surface des pores [ $L^2$ ]  
 $A_e$  – surface de section d'un échantillon [ $L^2$ ]  
 $A_t$  – surface totale [ $L^2$ ]  
 $S$  – périmètre du contact [ $L$ ]  
 $D$  – diamètre [ $L$ ]  
 $d_c$  – diamètre constant [ $L$ ]  
 $d_f$  – diamètre des fibres [ $L$ ]  
 $\overline{d_p}$  – diamètre des pores moyen [ $L$ ]  
 $L_e$  – longueur effective [ $L$ ]  
 $L$  – longueur [ $L$ ]  
 $b$  – largeur [ $L$ ]  
 $h$  – hauteur [ $L$ ]  
 $m$  – masse [ $M$ ]  
 $Q$  – débit volumique [ $L^3/T$ ]  
 $P, p$  – pression [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]  
 $u$  – vitesse d'écoulement [ $LT^{-1}$ ]  
 $T$  – température [ $K$ ]  
 $\beta$  – coefficient de thermoviscosité [ $K^{-1}$ ]  
 $\mathbb{D}$  – dispersion  
 $k_K$  – coefficient de Kozeny  
 $k_{KC}$  – coefficient de Kozeny-Carman  
 $C_f$  – coefficient de Forchheimer [ $L^{-1}$ ]  
 $C_1, C_2$  – constante d'intégration  
 $\sigma$  – écart type  
 $\gamma_1$  – coefficient d'asymétrie

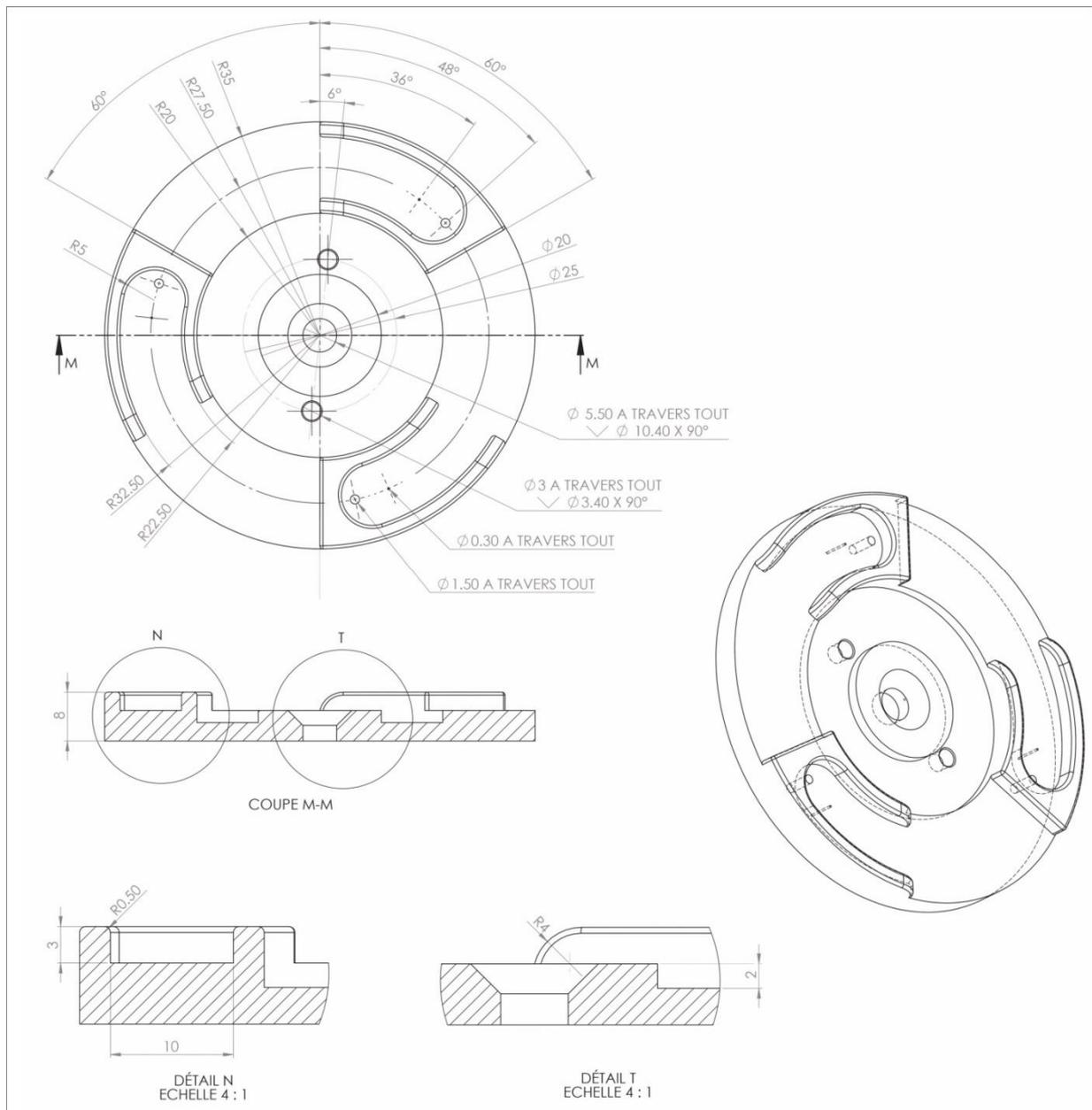


## Annexe 1. Dessin du dislocateur initial





## Annexe 2. Dessin du dislocateur avec la poche profonde



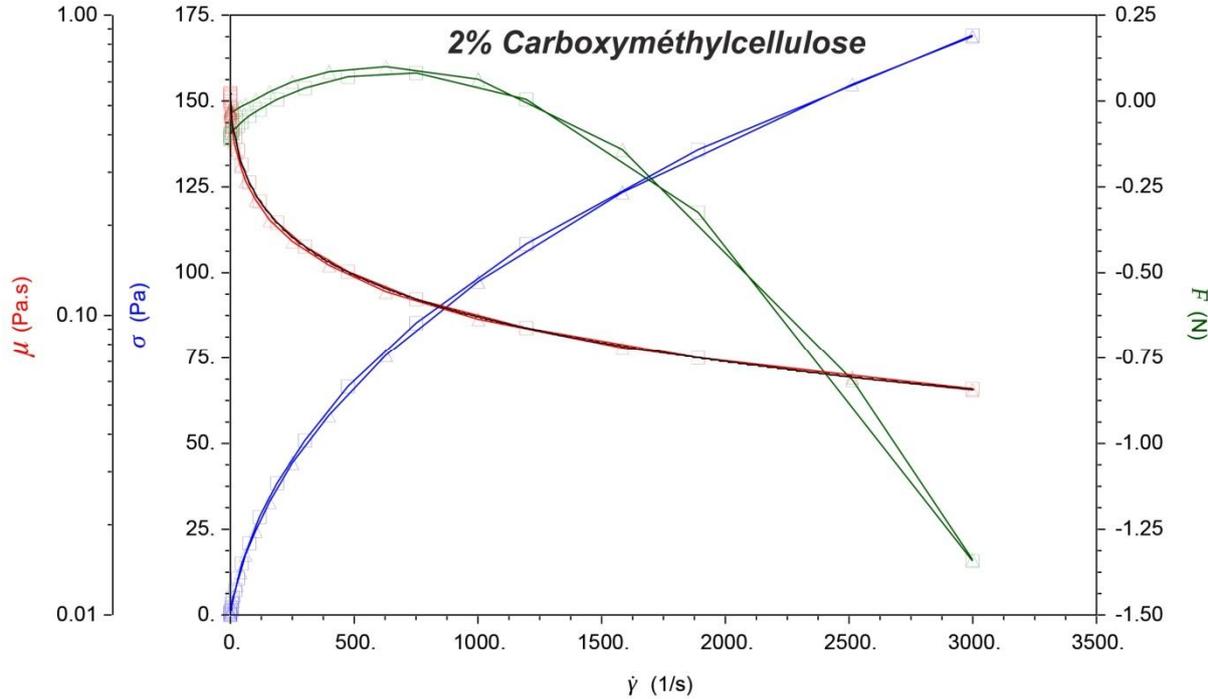
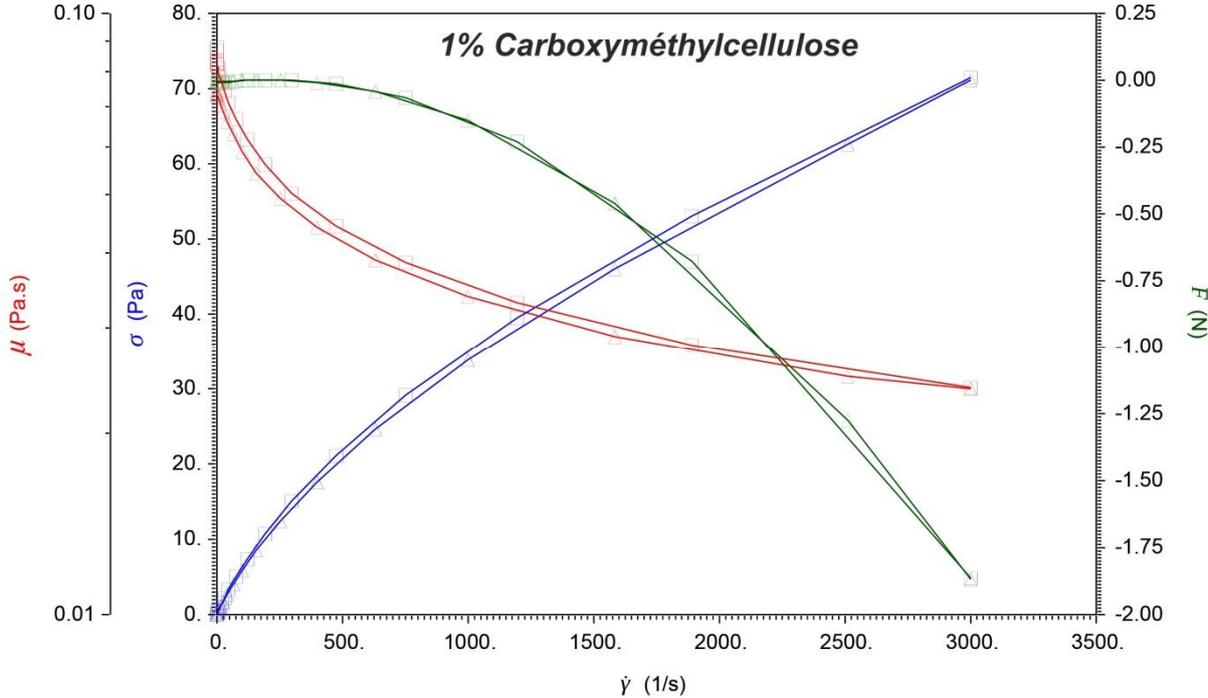


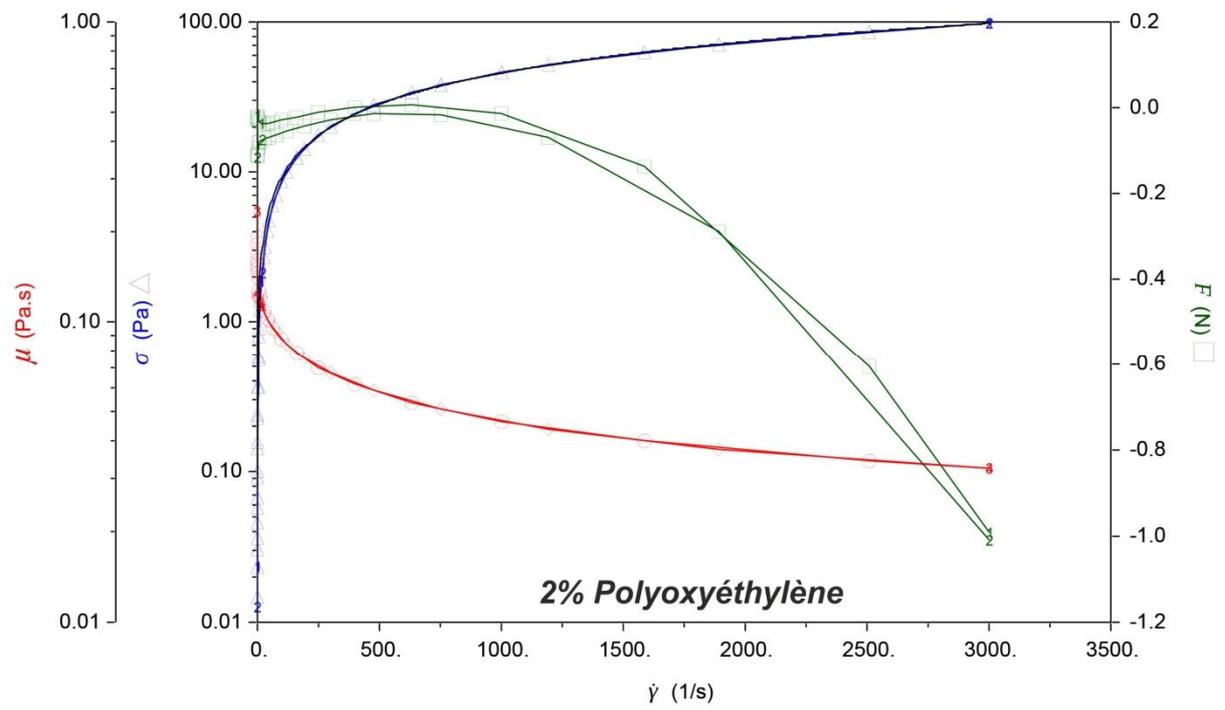
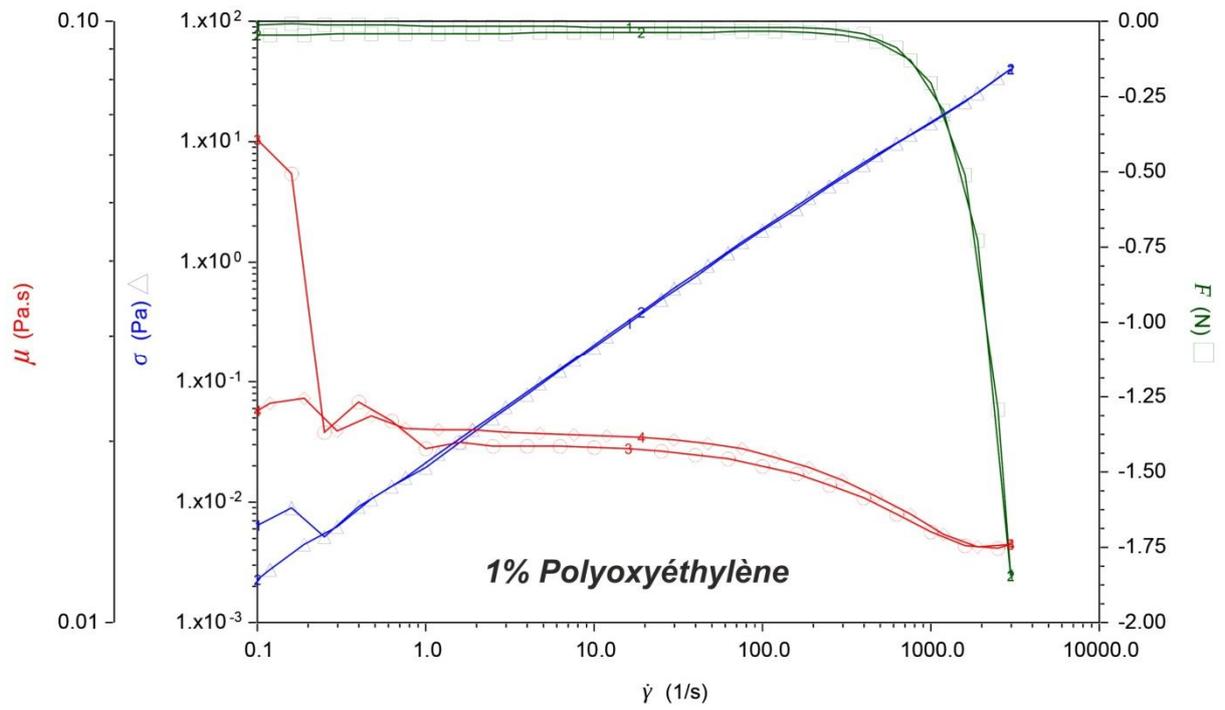




# Annexe 4. Caractéristiques rhéologiques de liquides non-newtoniens

Ici,  $\dot{\gamma}$  taux de cisaillement,  $\mu$  viscosité dynamique,  $F$  force normale,  $\sigma$  contrainte de cisaillement.





### Loi de Carreau–Yasuda

La viscosité apparente  $\mu$  est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})(1 + (\lambda\dot{\gamma})^a)^{\frac{n-1}{a}}$$

où apparaissent les paramètres suivants :

$\mu_0$  – viscosité à cisaillement nul (Pa·s) ;

$\mu_{\infty}$  – viscosité à cisaillement infini (Pa·s) ;

$\lambda$  – temps de relaxation (s) ;

$n$  – exposant sans dimension (identique à celui de la loi d'Oswald) ;

$\dot{\gamma}$  – taux de cisaillement ;

$a$  – paramètre sans dimension décrivant la transition entre le premier plateau newtonien et la zone en loi de puissance.



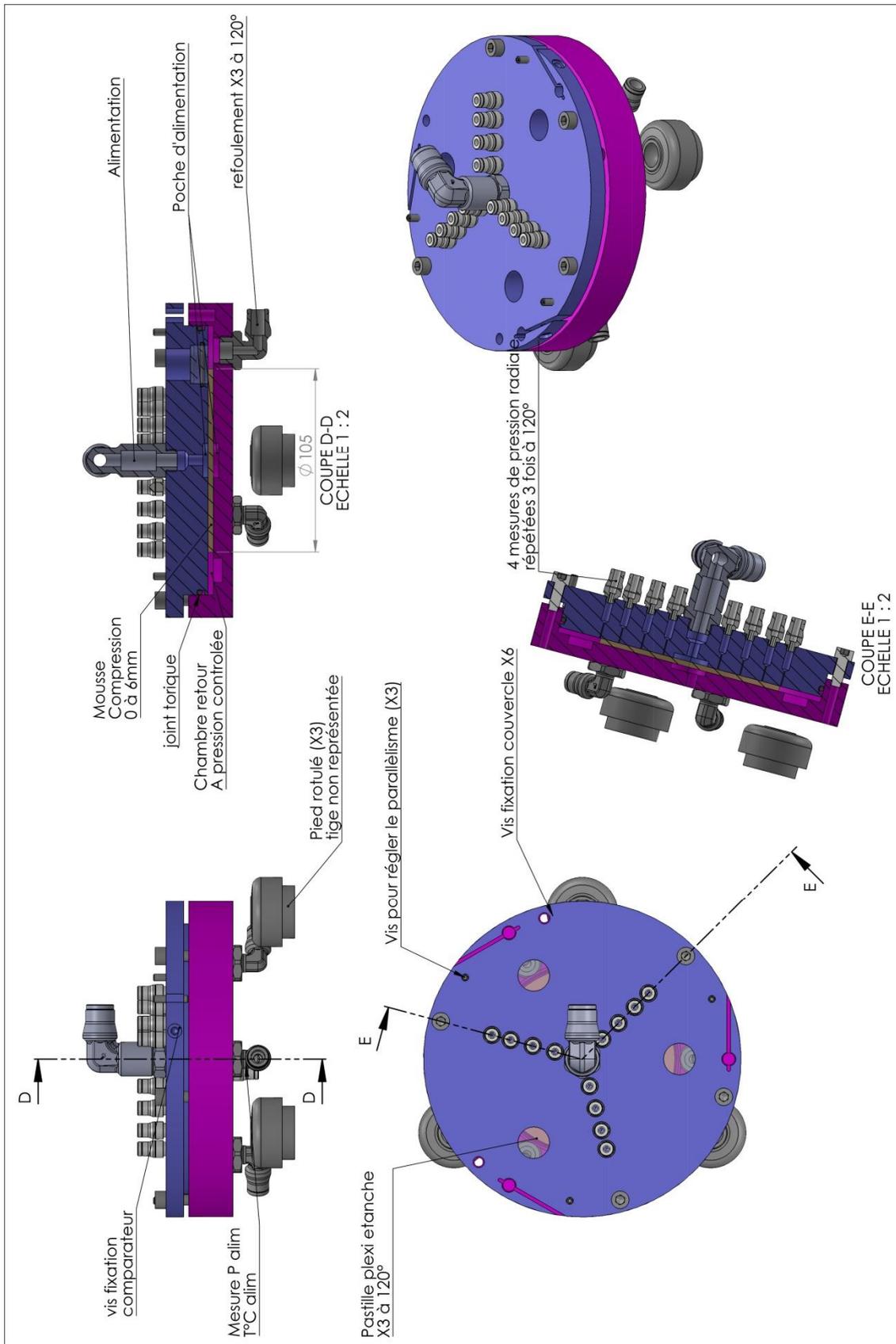
## Annexe 5. Intégration de l'équation de la vitesse (3.6)

---

$$\begin{aligned}
 \int_0^h u(y) dy &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy + \\
 &\quad + U_2 \frac{1}{\sinh(\omega h)} \int_0^h \sinh(\omega y) dy + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h \cosh(\omega y) dy - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^h dy = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega y)}{\omega} \right) \Big|_0^h - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega y)}{\omega} \right) \Big|_0^h + \\
 &\quad + U_2 \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega y)}{\omega} \right) \Big|_0^h + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\sinh(\omega y)}{\omega} \right) \Big|_0^h - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y) \Big|_0^h = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h)}{\omega} - \frac{\cosh(\omega * 0)}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h)}{\omega} - \frac{\cosh(\omega * 0)}{\omega} \right) + \\
 &\quad + U_2 \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h)}{\omega} - \frac{\cosh(\omega * 0)}{\omega} \right) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\sinh(\omega h)}{\omega} - \frac{\sinh(\omega * 0)}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (h - 0) = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega} \right) + \\
 &\quad + U_2 \frac{1}{\sinh(\omega h)} \left( \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega} \right) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\sinh(\omega h)}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega} \right) \left( \frac{1}{\sinh(\omega h)} - \frac{\cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \right) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\sinh(\omega h)}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + \\
 &\quad + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega} \right) \left( \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\sinh(\omega h)} \right) + \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{\sinh(\omega h)}{\omega} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{(\cosh(\omega h) - 1)(1 - \cosh(\omega h)) + \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{-(1 - \cosh(\omega h))(1 - \cosh(\omega h)) + \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{-(1 - \cosh(\omega h))^2 + \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
 &= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{-(-1 - 2\cosh(\omega h) + \cosh^2(\omega h)) + \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{-1 + 2\cosh(\omega h) - \cosh^2(\omega h) + \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
&= \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( -\frac{1 - 2\cosh(\omega h) + \cosh^2(\omega h) - \sinh^2(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
&= -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{1 - 2\cosh(\omega h) + 1}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
&= -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{2 - 2\cosh(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
&= -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( 2 \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} \right) - \frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)} = \\
&= -\frac{\phi}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( 2 \frac{1 - \cosh(\omega h)}{\omega \sinh(\omega h)} + h \right) + U_2 \frac{\cosh(\omega h) - 1}{\omega \sinh(\omega h)}.
\end{aligned}$$

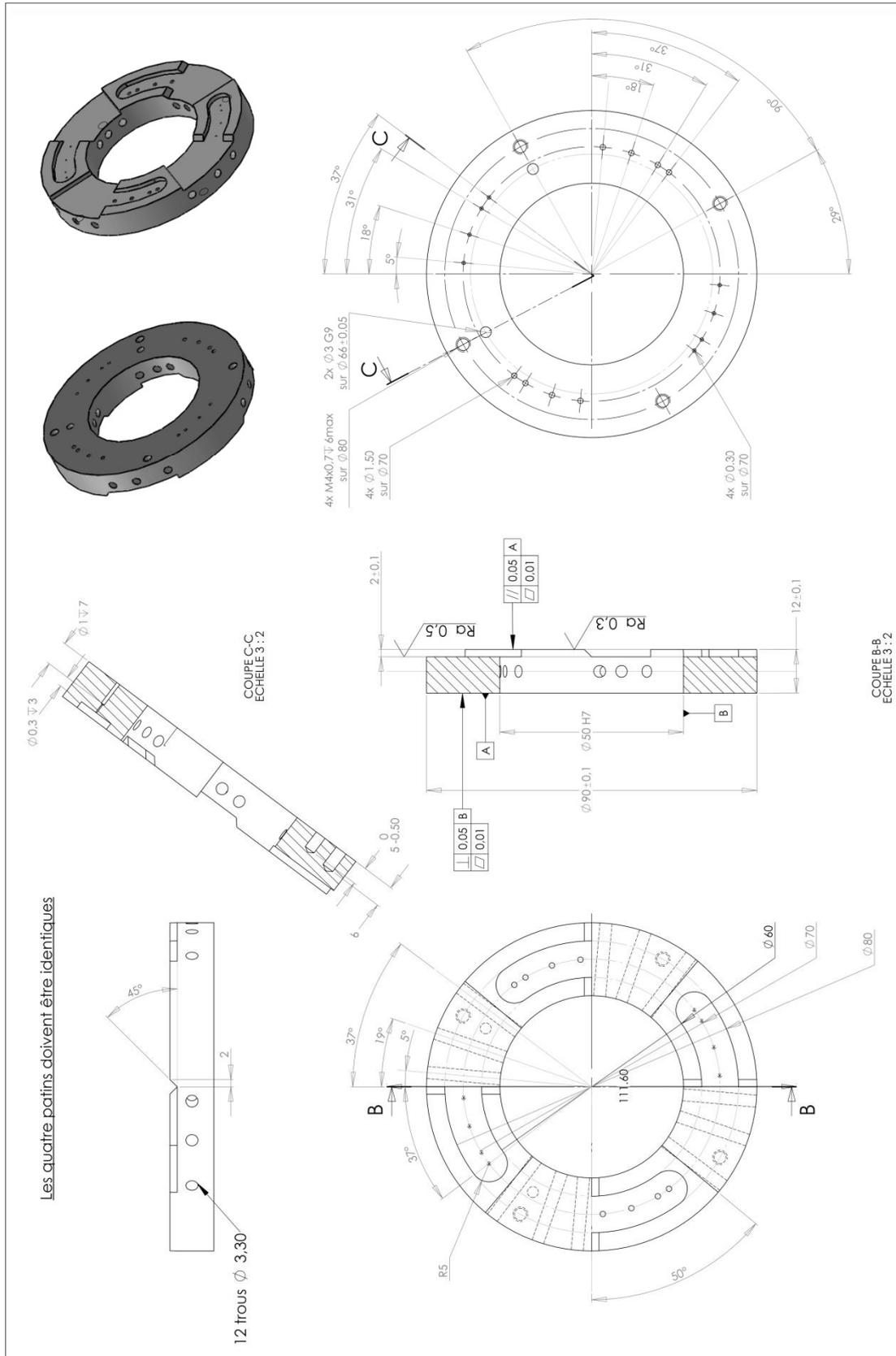
## Annexe 6. Schéma du perméamètre circulaire





# Annexe 7. Dessin du dislocateur pour le banc d'essais

## «Butées»





## Références

- [i1] Chichinadze A. V., Braun E. D., Bouché N. A., *Les fondements de la tribologie : frottement, usure, lubrification*, ISBN 5-217-03053-4, Édition Machinostroenie, Moscou, 2001 (en russe).
- [i2] Jones W. R. Jr., Jansen M. J., *Space Tribology*, NASA/TM-2000-209924, March 2000.
- [i3] Myshkin N. K., Goryacheva I. G., *Tribology: Trends in the Half-Century Development*, Journal of Friction and Wear, Volume 37, No. 6, pp. 513-516, 2016.
- [i4] <https://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/alpes-maritimes/commandant-cousteau-origine-du-materiel-plongee-aqua-lung-carros-06-1105881.html> (consulté le 1 mars 2017).
- [1] Scheidegger A. E., *The physics of flow through porous media*, Third edition, University of Toronto Press, 1974.
- [2] Collins R. E., *Flow of fluids through porous materials*, Reinhold publishing corporation, New York, 1961.
- [3] Oxford Earth Sciences Image Store, <https://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/> (consulté le 13 septembre 2016).
- [4] Landinez-Parra N. S., Garzon-Alvarado D. A., Vanegas-Acosta J. C., Goswami T., *Mechanical Behavior of Articular Cartilage*, Injury and Skeletal Biomechanics Edited by Tarun Goswami, InTech, 2012.
- [5] Kenneth L. Rubow, *Porous Metal for Aerospace*, Advanced Materials & Processes, Volume 167, Issue 10, October 2009.
- [6] [http://www.nasa.gov/images/content/185934main\\_s118e06229\\_hires.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/185934main_s118e06229_hires.jpg) (consulté le 13 septembre 2016).
- [7] [http://www.continental-corporation.com/www/pressportal\\_com\\_en/themes/press\\_releases/3\\_automotive\\_group/powertrain/press\\_releases/pr\\_2016\\_04\\_14\\_ringkatalysator\\_en.html](http://www.continental-corporation.com/www/pressportal_com_en/themes/press_releases/3_automotive_group/powertrain/press_releases/pr_2016_04_14_ringkatalysator_en.html) (consulté le 13 septembre 2016).
- [8] Le magazine de la recherche et de ses applications «Les défis de CEA», №199, Mai-Juin 2015.
- [9] <http://www.zimmer.com/medical-professionals/products/knee/primary-porous-patella-tm.html> (consulté le 13 septembre 2016).
- [10] <http://blog.autoplus.fr/moncet/2011/04/25/alonso-a-propos-de-son-casque/> (consulté le 13 septembre 2016).

- [11] Nield D.A., Bejan A., *Convection in Porous Media*, Fourth Edition, Springer, New York, 2013.
- [12] Darcy H., *Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*, Editeur Victor Dalmont, Paris, 1856.
- [13] Hubbert M. King, *The Theory of Ground-Water Motion*, The Journal of Geology, Volume 48, No. 8, Part 1, pp.785-944, November – December 1940.
- [14] Nutting P.G., *Physical Analysis of Oil Sand*, Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, Volume 14, pp. 1337-1349, 1930.
- [15] Lundström T.S., Toll S., Håkanson J.M., *Measurement of the Permeability Tensor of Compressed Fibre Beds*, Transport in Porous Media, Volume 47, Issue 3, pp. 363-380, June 2002.
- [16] Mekic S., Bakke B., *Radial infusion models for permeability measurements of compressed fibrous beds*, International journal of multiphase flow, Volume 48, pages 1-10, January 2013.
- [17] Popescu C.S., Marian V., Pascovici M.D., *Experimental and theoretical analysis of the permeability for highly compressible porous layers*, Journal of the Balkan Tribological Association, Volume 15, No. I, pp. 86-92, 2009.
- [18] Ilie M.B., *Damping capacity of highly compressible porous layers imbibed with liquids for cylindrical configuration*, Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Bucarest, 2011 (en roumain).
- [19] Akaydin H.D, Pierides A., Weinbaum S., Andreopoulos Y., *Permeability of soft porous media under one-dimensional compaction*, Chemical Engineering Science, Volume 66, pp. 1-14, 2011.
- [20] TOTAL SA, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHES SCIENTIFIQUE (CNRS), Mesures de paramètres liés à l'écoulement de fluides dans un matériau poreux, 2011, Lasseux D., Jannot Y., Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle, WO 2011/089367 A1.
- [21] Scheidegger A. E., *Theoretical Models of Porous Matter*, Producers Monthly, Volume 17, № 10, p.17, 1953.
- [22] Purcell W.R., *Capillary Pressures. Their Measurement using Mercury and the Calculation of Permeability therefrom*, Transactions AIME, Volume 186, p. 39, 1949.
- [23] Schopper J.R., *A Theoretical Investigation on the Formation Factor/Permeability/Porosity Relationship using a Network Model*, Geophysical Prospecting, Volume 14, Issue 3, pp. 301-341, September 1966.

- [24] Kozeny J., *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden*, Sitzungsbericht Akademie Wissenschaft, Wien, 136 (2a), pp. 271-306, 1927 (en allemand).
- [25] Carman P.C., *Fluid Flow Through Granular Beds*, Transaction of the Institution of Chemical Engineers, Volume 15, pp. 155-166, 1937.
- [26] Ghaddar C.K., *On the permeability of unidirectional fibrous media: A parallel computational approach*, Physics Fluids, Volume 7, Issue 11, pp. 2563-2586, 1995.
- [27] Emersleben O.V., *Das Darcysche Filtergesetz*, Physikalische Zeitschrift, 26, pp. 601-610, 1925 (en allemand).
- [28] Childs E.C., Collins-George N., *The Permeability of porous Materials*, Proceedings of the Royal Society, Volume A 201, pp. 392-405, 1950.
- [29] Scheidegger A.E., *Statistical Hydrodynamics in Porous Media*, Journal of Applied Physics, Volume 25, pp. 994-1001, 1954.
- [30] Kambiz Vafai, *Handbook of porous media*, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [31] Trofinova T.A., Sheremet M.A., *Comparative analysis of Darcy and Brinkman models at studying of transient conjugate natural convection in a porous cylindrical cavity*, Computer research and Modeling, № 4, Volume 5, pp. 623-634, 2013 (en russe).
- [32] Bear J., *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publication, New York, 1988.
- [33] Muskat M., *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, McGraw-Hill Book Company, First Edition, New York and London, 1937.
- [34] Ward J.C., *Turbulent flow in porous media*, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Volume 90 (HY5), pp. 1-12, 1964.
- [35] Dupuit J.E.J., *Etudes théorique et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, 2<sup>ième</sup> édition, Editeur Dunod, Paris, 1863.
- [36] Joseph D.D., Nield D.A., Papanicolaou G., *Nonlinear Equation Governing Flow in a Saturated Porous Medium*, Water Resources Research, № 4, Volume 18, pp.1049-1052, 1982 and № 2, Volume 19, p. 591, Correction, 1983.
- [37] Beavers G.S., Sparrow E.M., Masha B.A., *Boundary conditions at a porous surface which bounds a fluid flow*, Journal of American Institute of Chemical Engineers, № 3, Volume 20, pp. 596-597, 1974.
- [38] Bejan A., *Convection Heat Transfer*, Fourth Edition, Wiley, New Jersey, 2013.

- [39] Brinkman H.C., *A Calculation of the Viscous Force Exerted by a Flowing Fluid on a Dense Swarm of Particles*, Journal of Applied Scientific Research, Volume A1, pp. 27-34, 1947.
- [40] Rubinstein J., *Effective equations for flow in random porous media with a large number of scales*, Journal of Fluid Mechanics, Volume 170, pp. 379-383, 1986.
- [41] Durlafsky L., Brady J.F., *Analysis of the Brinkman equation as a model for flow in porous media*, Physics of Fluids, Volume 30, Issue 11, pp. 3329-3341, 1987.
- [42] Auriault J. L., *On the domain of validity of Brinkman's equation*, Transport on Porous Media, Volume 83, pp. 257-266, 2009.
- [43] Lévy T., *Fluid Flow Through an Array of Fixed Particles*, International Journal of Engineering Science, Volume 21, Issue 1, pp. 11-23, 1983.
- [44] Frêne J., *Butée et paliers hydrodynamique*, Techniques de l'ingénieur, 1995.
- [45] <http://www.main-metall.com/de/die-hightech-lager/kipsegmentlager> (consulté le 15 juin 2017).
- [46] Heshmat H., *Multi-stage support element for compliant hydrodynamic bearing*, US Patent 4.300.806, 17 November 1981.
- [47] Arghir M., Le Lez S., Frêne J., *Butées et paliers aérodynamiques*, Techniques de l'ingénieur, 2009.
- [48] Pascovici M.D., *Lubrication by dislocation: a new mechanism for load carrying capacity*, In Proceeding of the 2<sup>nd</sup> World Tribology Congress, Vienna, p. 41-44, 2001.
- [49] Turtoi P., *Contributions to the study of squeeze flow through complex media*, Bucarest, Thèse de doctorat, 2016 (en roumain).
- [50] Procedure and device for pumping by fluid dislocation (Procedeu de pompare prin dislocarea fluidului si dispozitiv pentru realizarea acestuia, Pascovici M.D., 1994, Romanian Patent 109469 (en roumain).
- [51] Pascovici M.D., Cicone T., *Squeeze-film of unconformal, compliant and layered contacts*, Tribology International, Volume 36, pp. 791-799, 2003.
- [52] Pascovici M.D., Cicone T., Marian V.G., *Squeeze process under impact in highly compressible porous layers, imbibed with liquids*, Tribology International, Volume 42, pp. 1433-1438, 2009.
- [53] Pascovici M.D., *Lubrication of red blood cells in narrow capillaries. A heuristic approach*, 2<sup>nd</sup> Vienna International Conference on Micro and Nano-Technology, p. 95-100, 2007.

- [54] Research Foundation of The City of New York, Propulsion vehicle which travels along soft, porous track, 2009, Weinbaum S., Andreopoulos Y., Mirbod P., US 20110308422 A1.
- [55] Wu Q., Andreopoulos Y., Weinbaum S., *From Red Cells to Snowboarding: A new Concept for a Train Track*, Physical Review Letters, Volume 93, Number 19, pp. 19401-1 – 194501-4, 2004.
- [56] Wu Q., Andreopoulos Y., Xanthos S., Weinbaum S., *Dynamic compression of highly compressible porous media with application to snow compaction*, Volume 542, Issue 1, pp. 281-304, 2005.
- [57] Wu Q., Igci Y., Andreopoulos Y., Weinbaum S., *Lift Mechanics of Downhill Skiing and Snowboarding*, Medicine & Science in Sports & Exercise, Volume 38, Issue 6, pp. 1132-1146, 2006.
- [58] Feng J., Weinbaum S., *Lubrication theory in highly compressible porous media: the mechanics of skiing, from red cells to humans*, Journal of Fluid Mechanics, Volume 422, pp. 281-317, 2000.
- [59] Mirbod Y., Andreopoulos Y., Weinbaum S., *On the generation of lift forces in random soft porous media*, Journal Fluid Mechanics, Volume 619, pp. 147-166, 2009.
- [60] Dawson M.A., Germaine J.T., Gibson L.J., *Permeability of open-cell foam under compressive strain*, Journal of Solids and Structures, Volume 44, Issue 16, pp. 5133-5145, 2007.
- [61] Dawson M.A., McKinley G.H., Gibson L.J., *The Dynamic Compressive Response of Open-Cell Foam Impregnated With a Newtonian Fluid*, Journal of Applied Mechanics, Volume 75, Issue 4, pp. 041015-1–041015-11, 2008.
- [62] Dawson M.A., McKinley G.H., Gibson L.J., *The Dynamic Compressive Response of Open-Cell Foam Impregnated With a Non-Newtonian Fluid*, Journal of Applied Mechanics, Volume 76, Issue 6, pp. 061011-1–061011-8, 2009.
- [63] Dawson M.A., *Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam for blast protection of infrastructure*, International Journal of Impact Engineering, Volume 36, Issue 10-11, pp. 1288-1295, 2009.
- [64] Kühnlein M., Wendel T., Murrenhoff H., *Electrostatic charge measurement in hydraulic circuits*, The 13<sup>th</sup> Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP2013, Linköping, Sweden, June 3-5, 2013.
- [65] Pellizzi E., *Étude du vieillissement des mousses de polyuréthane ester et consolidation par les aminoalkylalkoxysilanes*, Thèse de doctorat, Université d'Évry Val d'Essonne, 2012.

- [66] Boomsma K., Poulikakos D., *The effect of Compression and Pore Size Variations on the Liquid Flow Characteristics in Metal Foams*, Journal of Fluids Engineering, Volume 124, pp. 263-272, March 2002.
- [67] ISO 3386-1 :1986, Matériaux polymères alvéolaires souples – Détermination de la caractéristique de contrainte-déformation relative en compression – Partie 1: Matériaux à basse masse volumique.
- [68] Basu S., *Quasi-static and Dynamic Compression Behavior of Flexible Cellular Material*, Application Note, Agilent Technologies Inc., 5990-9753EN, 2012.
- [69] Guyon É., Hulin J-P., Petit L., *Hydrodynamique Physique*, 3<sup>ième</sup> édition, EDP Sciences/CNRS Édition, Paris, 2012.



## ***Étude numérique et expérimentale du mécanisme de lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD)***

La lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD) est un mécanisme de lubrification d'inspiration biomimétique. Il s'agit principalement d'un écoulement dans un milieu poreux dont la phase solide, représentée par des fibres, induit des forces élastiques de compression considérées comme négligeables par rapport aux forces hydrodynamiques générées à l'intérieur du milieu poreux. L'idée essentielle de la lubrification XPHD consiste à remplacer le matériau antifriction et le film de fluide mince, traditionnellement utilisé dans les solutions classiques, par une couche poreuse imbibée d'un fluide qui fournit une plus grande capacité de charge. Ce type de lubrification représente une solution technologique totalement nouvelle (en rupture avec la solution classique) qui peut permettre de remplacer les lubrifiants pétroliers, de créer des systèmes tribologiques autolubrifiants et donc plus écologiques et moins coûteux.

Ce travail de recherche est focalisé sur l'étude des performances de la lubrification XPHD dans le cadre d'un mouvement tangentiel, adapté au cas de butées à faible et moyenne vitesses de rotation. Dans ce contexte scientifique, une étude approfondie d'un matériau poreux présélectionné (mousse en polyuréthane) fut réalisée dans le but de déterminer les caractéristiques physiques et les paramètres cruciaux pour la lubrification XPHD que sont la porosité et la perméabilité du matériau poreux.

Les modèles théorique et numérique de lubrification XPHD proposés se basent sur l'équation de Darcy-Brinkman. Les hypothèses de la lubrification classique sont utilisées, et l'écoulement à l'intérieur du milieu poreux est prédit avec une nouvelle forme de l'équation de Reynolds.

Un banc d'essais spécialement développé permet d'étudier expérimentalement le mécanisme de lubrification XPHD des différents types de butées en combinaison avec des liquides newtoniens et non-newtoniens. Une comparaison des résultats de modélisation et des résultats expérimentaux est enfin présentée.

**Mots-clés :** lubrification eX-Poro-HydroDynamique (XPHD), milieu poreux, perméabilité, butée.

### ***Numerical and experimental study of eX-Poro-HydroDynamic lubrication mechanism***

The eX-Poro-HydroDynamic (XPHD) lubrication is a new biomimetic inspired lubrication mechanism. It consists of self-sustained fluid films generated within highly compressible porous layers imbibed with liquids, whose solid phase, represented by fibers, induces compressive elastic forces considered negligible compared to the hydrodynamic forces generated inside the porous medium. The essential idea of XPHD lubrication is to replace the antifriction material and the thin fluid film, traditionally used for classical sliding motion, with a porous layer imbibed with a fluid that provides a greater load carrying capacity. This type of lubrication represents a completely new technological solution (a departure from classical one) that can replace petroleum lubricants, create self-lubricating and therefore more ecological and less expensive tribological systems.

This research work is focused on the study of XPHD lubrication performances in the context of a tangential movement, adapted to the study of thrust bearing for low and medium rotation speeds. In this scientific context, a thorough study of a preselected porous material (polyurethane foam) was carried out with the aim of determining the physical characteristics and the crucial parameters for XPHD lubrication: the porosity and the permeability of the porous material.

The proposed theoretical and numerical models of the XPHD lubrication are based on the Darcy-Brinkman equation. Using the classical lubrication hypothesis, the flow within the porous media is predicted with a new form of the Reynolds equation.

A specially developed test rig is used to investigate experimentally the mechanism of the XPHD lubrication for different types of thrust bearing in combination with Newtonian and non-Newtonian liquids. A detailed description of the test rig, as well as a comparison between the experimental and numerical results are then presented.

**Key words:** eX-Poro-HydroDynamic (XPHD) lubrication, porous media, permeability, thrust bearing.