

# Elaboration d'un prototype de distributeur auto-régulé

J. DEBORDE<sup>1</sup>, S. TOMAS<sup>1</sup>, B. MOLLE<sup>1</sup>, A. BOUKAMEL<sup>2</sup> ET F. ANSELMET<sup>3</sup>

1. CEMAGREF d'Aix en Provence, 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix en Provence (France)
2. Ecole Centrale de Marseille & Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille (ECM & LMA), Technopôle de Château-Gombert, 38 Rue Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 20 (France)
3. Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), Technopôle de Château-Gombert, 49 rue Joliot-Curie, B.P. 146, 13384 Marseille cedex 13 (France)

## Résumé :

*Cette étude porte sur les interactions entre un fluide et une membrane hyperélastique ayant pour fonction de réguler un écoulement. Le comportement de la membrane contrainte par la pression a été simulé sous Abaqus. Ces résultats ont permis de modéliser l'écoulement (code CFD commercial) lorsque la membrane est déformée et de déterminer la loi débit/pression du dispositif. Ces développements numériques s'appuient sur la méthode des éléments finis et sur un algorithme de résolution itératif pour le couplage. Les modèles numériques sont validés expérimentalement. Ces travaux participent à l'élaboration d'un prototype de distributeur auto-régulé.*

## Abstract:

*This study focuses on the interactions between a fluid and a hyperelastic membrane whose function is to regulate flow. The behaviour of the membrane under pressure stress was simulated using Abaqus. These results were used to model the flow (commercial CFD) when the membrane is distorted and to determine its flow versus pressure law. These developments are based on numerical finite element method and an iterative solution algorithm for coupling. The numerical models are validated experimentally. This work contributes to the development of a prototype of regulated emitter.*

**Mots clefs :** Interactions Fluide-Structure, Analyse axisymétrique, Déformation du maillage.

## 1 Introduction et contexte général

Dans le cadre de la phytoremédiation (dépollution d'une eau usée par les plantes), on souhaite proposer un distributeur à faible débit (entre 5 et 50 l/h) capable à la fois de répartir des eaux chargées sans se colmater, de délivrer un débit constant quelle que soit la pression à laquelle il est soumis, tout en conservant un prix de revient réduit. Pour respecter le cahier des charges, on cherche à réguler le débit au niveau des distributeurs. Le dispositif envisagé dérive d'un goutteur d'irrigation agricole incluant des matériaux en élastomères. Des travaux préliminaires [1] ont permis de caractériser le comportement mécanique de l'élastomère. La présente étude concerne les interactions entre l'effluent et l'élastomère, i.e. entre un fluide et une membrane hyperélastique régulatrice de l'écoulement. Il existe plusieurs types de couplages mais surtout deux d'entre eux sont principalement utilisés : les couplages multi-physiques et les couplages multi-échelles. Ces deux techniques sont assez fiables mais demandent soit un intergiciel tel que MPCCI [2] soit un temps de calcul à faible échelle long et coûteux. Nous avons donc couplé le modèle de comportement d'une membrane circulaire contrainte par la pression sous Abaqus en axisymétrique (2D) avec le « Workbench » d'ANSYS/Fluent. Ces résultats ont permis de modéliser l'écoulement (code CFD commercial) lorsque la membrane est déformée et de déterminer la loi débit/pression du dispositif. Ces développements numériques s'appuient sur la méthode des éléments finis

incompressibles de type C8X8H en description lagrangienne [3] et sur un algorithme de résolution itératif pour le couplage. Pour valider ces résultats, des expérimentations ont été développées.

## 2 Matériels & méthodes

### 2.1 Approches expérimentales

Des premiers travaux ont permis de caractériser le comportement de la membrane en traction [1] répondant à un modèle de comportement hyperélastique incompressible de Yeoh [4]. L'objectif des présentes expériences est d'analyser la réponse du matériau soumis aux contraintes appliquées par le passage d'un fluide. Le prototype de distributeur est un assemblage de plusieurs blocs (FIG. 1a et 1b : vue éclatée) contenant la membrane régulatrice. Deux configurations sont testées :

- La membrane contrainte (épaisseur 1 mm, orifice 2 mm) est pincée à sa périphérie entre les pièces mécaniques (blocs de plexiglas percés en leur centre d'un orifice de 20 mm) et travaille en élasticité (FIG. 1a). On observe une pré-contrainte de la membrane due au serrage des vis avant mise sous pression hydraulique (FIG. 1c).
- La membrane libre (épaisseur 1 mm, diamètre 24 mm, orifice 2 mm), seulement intercalée entre deux pièces, travaille en rigidité. Elle a un diamètre de 25mm et vient s'appuyer sous l'effet de la pression sur un siège de 20 mm de diamètre (FIG. 1b) dans la partie aval. La régulation est assurée par l'orifice de la membrane, et la diminution de la section de passage due à sa déformation.

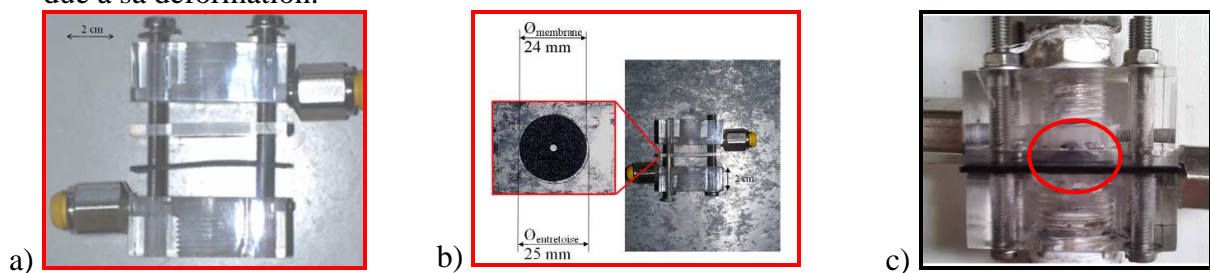


FIG. 1 – Représentation en vue éclatée du dispositif à membrane contrainte (a) et à membrane libre (b) et c) Photographie montrant la pré-déformation de la membrane à l'état initial.

La loi débit/pression de ces distributeurs a été déterminée à l'aide d'un banc (FIG. 2). Cinq cycles de « charges-décharges » ont été effectués pour éliminer l'effet Mullins [5] propre à ces matériaux. Trois membranes sont testées afin de vérifier la reproductibilité des phénomènes observés.

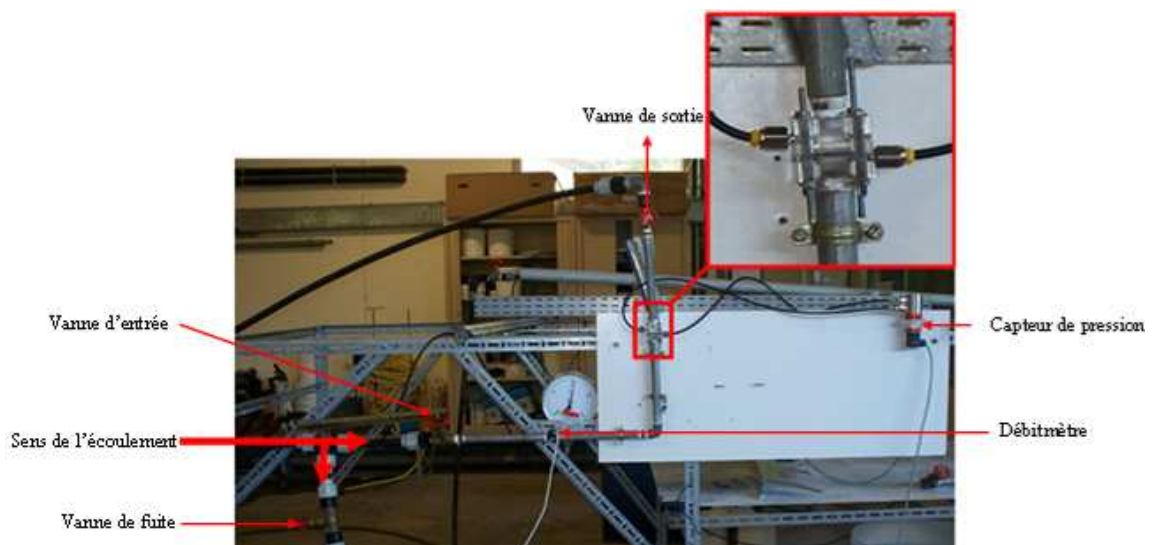


FIG. 2 - Photographie du banc d'essai avec son prototype de distribution.

## 2.2 Approches numériques

On cherche à prédire le comportement hyperélastique du distributeur par simulation de différentes géométries. Le couplage Abaqus-Fluent se fait via le module Workbench intégré dans l'interface d'ANSYS/Fluent, cette technique demande très peu de temps de calcul du fait qu'on travaille en axisymétrie (2D) pour la partie solide. Il s'effectue en deux temps: sous Abaqus pour simuler le déplacement de la membrane en fonction de la pression du fluide (2D), sous ANSYS/Fluent pour simuler l'écoulement en tenant compte de la déformation de la membrane pour obtenir point par point la loi débit/pression du dispositif (3D) (FIG. 3).

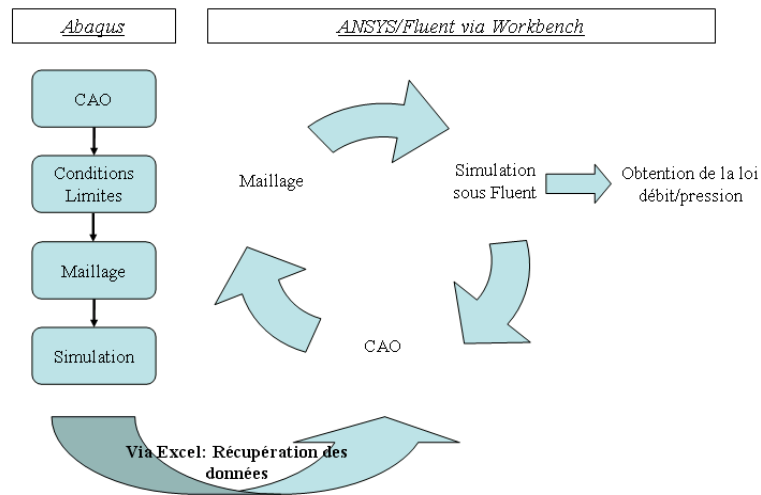


FIG. 3 – Algorithme de couplage Abaqus-ANSYS/Fluent.

L'ensemble des développements est basé sur la méthode des éléments finis et un algorithme de résolution itératif pour le couplage fluide/membrane. Des travaux préliminaires [1] ont permis de caractériser le comportement mécanique de l'élastomère. Le choix s'est porté sur :

- Le modèle de comportement hyperélastique incompressible de Yeoh, dont la forme de la densité d'énergies de déformation  $W$  s'écrit :

$$W = Q(I_1) = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + C_{30} \cdot (I_1 - 3)^3 \quad (1); \text{ avec } I_1 \text{ le premier invariant de déformation, } C_{10}, C_{20}, C_{30} \text{ les paramètres caractéristiques du matériau à caler expérimentalement.}$$

- Le modèle de turbulence  $k - \varepsilon$  standard qui est un cas simple employé dans l'industrie car assez robuste et avec des facilités de convergence. Par ailleurs, il est privilégié pour de faible niveau de turbulence, ce qui est le cas de l'écoulement étudié : turbulence en entrée quasi-nulle, majeure partie de l'écoulement laminaire ( $Re = 2000$ ) sauf au niveau de l'orifice de la membrane où le nombre de Reynolds est de l'ordre de  $2.10^4$ .

Ce modèle est basé sur deux logiciels commerciaux et recoupé via l'exportation des points sous Excel à partir d'Abaqus concernant la membrane et injecté dans ANSYS/Fluent pour obtenir l'écoulement au travers de l'orifice de la membrane et au sein du dispositif de distribution.

## 3 Résultats

### 3.1 Membrane dite « contrainte »

On considère que la membrane est encastrée dans un bloc solide (carré bleu de la FIG. 4a) et on applique une différence de pression entrée/sortie croissante [0 à 0.5 bars] par pas de 0,1bar sur la partie libre ; seul le déplacement des deux points de l'extrémité libre de la membrane ( $P_1$  et  $P_2$ ) est

suivi (FIG. 4b). Cette série de valeurs est ensuite importée sous ANSYS/Fluent pour modéliser l'évolution des propriétés de l'écoulement.

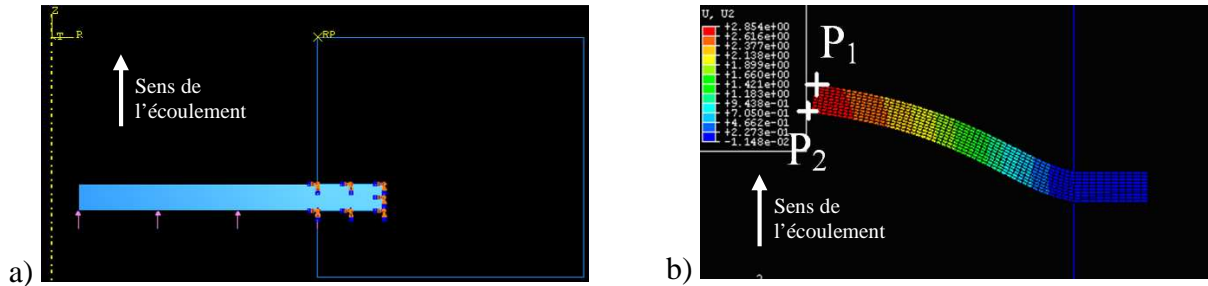


FIG. 4 – a) Membrane contrainte à l'état initial ( $\Delta P=0$  bar) et b) Déformation de la membrane pour  $\Delta P=0,5$  bar (U déformation en mm).

Les champs de pression et de vitesse (FIG. 5 et FIG. 6) réalisés à la déformée maximum de la membrane montrent une forte augmentation de vitesse (4 fois celle de l'entrée) et de perte de charge (de l'ordre de 25%) au niveau de l'orifice.

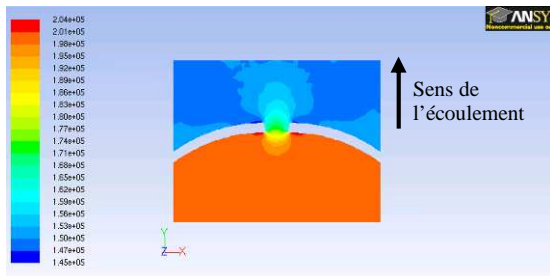


FIG. 5 - Champ de pression pour un  $\Delta P=0,5$  bar.

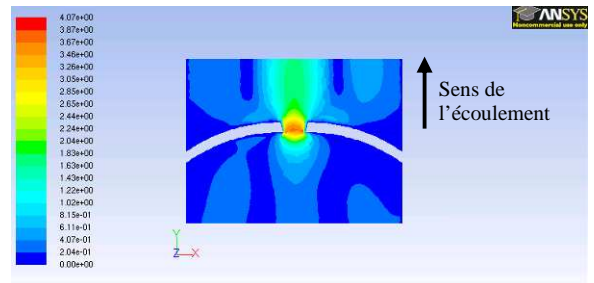


FIG. 6 - Champ de vitesse pour un  $\Delta P=0,5$  bar.

Cependant, d'un point de vue technique, cette option, du fait de la pré-déformation à l'état initial, limite considérablement les capacités de régulation du dispositif. Nous avons donc envisagé un nouveau prototype dans lequel la membrane est montée libre à l'intérieur du dispositif et travaille non plus en élasticité mais en rigidité.

### 3.2 Membrane dite « libre »

Dans cette configuration, la membrane peut se mouvoir dans un espace de 2 mm de hauteur et d'un diamètre de 25 mm (FIG. 7a). On observe expérimentalement que la surface supérieure de la membrane reste en contact avec le bloc solide sous l'effet de la pression. Cette liaison a été matérialisée par un contact linéaire entre la surface de la membrane et l'angle de la cavité lui permettant de se déformer librement sous l'effet de la pression hydraulique. Cette déformation est obtenue pour une différence de pression entrée/sortie de 0.2 bar. Ce  $\Delta P$  correspond à la valeur maximale de perte de charge obtenue *in-lab* (FIG. 10).



FIG. 7 – a) Membrane libre à l'état initial ( $\Delta P=0$  bar) et b) Déformation de la membrane pour  $\Delta P=0,2$  bar (U déformation en mm).

La membrane n'est plus contrainte d'un côté mais glisse au niveau du point de contact de la FIG. 7a linéairement sur le coin inférieur de la réduction de la chambre supérieure. Pour suivre le comportement de la membrane dans son ensemble, on suit un point toutes les dix mailles, ce qui permet de décrire la fonction de la membrane à partir de 12 points (la pièce étant maillée en 50 par 10). Comme précédemment, Abaqus fournit un tableau reliant coordonnées des points et  $\Delta P$  imposé à la membrane qui est intégré sous ANSYS/Fluent pour simuler l'écoulement. Les champs de pression et de vitesse à la déformée maximum de la membrane sont présentés respectivement sur les FIG. 8 et FIG. 9. On peut observer la bonne régularité du mouvement du fluide, la forte augmentation de vitesse et de même la plus importante perte de charge au niveau de l'orifice. Nous remarquons aussi l'uniformité de l'écoulement et de ce fait l'apparition de zone de fluide mort que nous ne retrouvons pas pour la membrane dite « contrainte ».

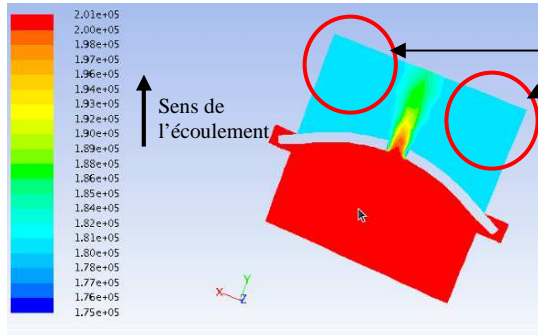


FIG. 8 - Champ de pression pour un  $\Delta P=0,2$  bar.

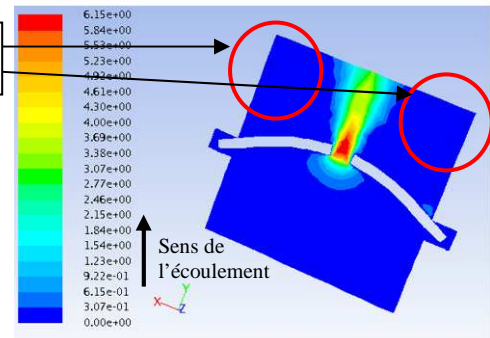


FIG. 9 - Champ de vitesse pour un  $\Delta P=0,2$  bar.

### 3.3 Bilan

Les débits correspondant à chaque  $\Delta P$  permettent de définir une loi débit/pression numérique pour ces configurations de prototypes. Ces relations obtenues numériquement sont comparées aux résultats expérimentaux (FIG. 10).

On observe une plus grande dispersion des résultats expérimentaux dans le cas de la membrane contrainte (triangle). Cet écart est lié à la pré-contrainte imposée à la membrane qui est différente pour chaque serrage du prototype. Aussi, d'un point de vue réalisation l'option de membrane libre est préférable. Ceci étant, tant pour la membrane contrainte (courbe en rouge, FIG. 10) que la membrane libre (courbe en bleu) les résultats numériques sont proches de ceux de l'expérience ou reste dans l'intervalle d'erreur de l'expérimentation. Les différences observées entre simulations numériques et mesures expérimentales peuvent s'expliquer principalement par l'incertitude sur le positionnement et le perçage de la membrane. On peut donc considérer que la méthode de couplage numérique est satisfaisante.

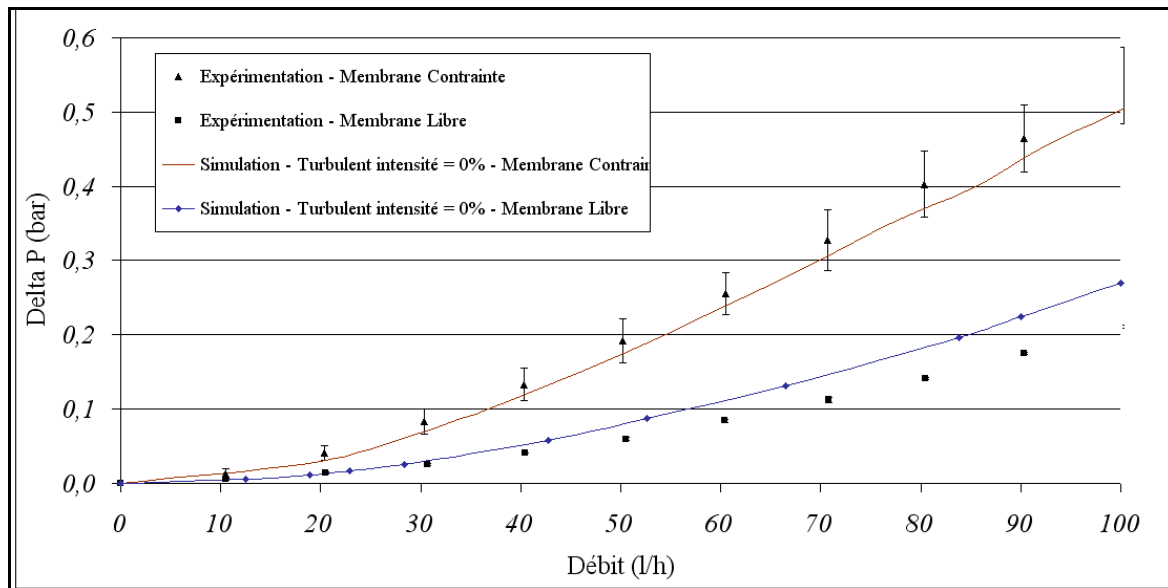


FIG. 10 - Comparaison des résultats débit-pression pour les membranes contrainte et libre.

#### 4 Conclusions et perspectives

Les deux modèles numériques développés sont en accord avec les données expérimentales, ils permettent de décrire l'interaction fluide/membrane de manière satisfaisante. Concernant les intervalles d'erreur des courbes expérimentales, de la FIG. 10, nous observons une meilleure reproductibilité des différents essais hydrauliques concernant la membrane dite « libre » malgré son positionnement aléatoire à la mise sous pression. Concernant l'objectif de régulation, les deux dispositifs montrent une faible perte de charge aux alentours des 50 l/h (cahier des charges) mais une bonne capacité de déformation. Nous retenons pour la suite la solution de la membrane libre dans le distributeur s'approchant plus de la régulation souhaitée et permettant un retour à l'état initial non déformé, et donc une meilleure reproductibilité du fonctionnement. Pour exploiter les propriétés de déformation de la membrane, on va travailler avec une chambre de sortie dans laquelle la perte de charge sera variable en fonction de la déformation de la membrane.

Pour ces nouveaux dispositifs, les hypothèses d'axisymétrie ne pourront pas être utilisées, aussi il conviendra d'employer la méthode de couplage multi-physique Abaqus-Fluent via la passerelle de MPCCI [6] pour modéliser des systèmes plus complexes en 3D.

#### Référence :

- [1] Deborde, J. Analyse du comportement hyperélastique d'un tuyau en EPDM: Application pour distribuer de l'eau en irrigation. In *Proceedings of the JET'10, La mécanique et les matériaux, moteurs du développement durable* (Marrakesh, Mai, 2010).
- [2] Joppich, W. and Kürschner, M. MpCCI : a Tool for the Simulation of Coupled Applications. *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, 18(2):183–192, 2006.
- [3] Cescotto, S. and Fonder, G. FINITE-ELEMENT APPROACH FOR LARGE STRAINS OF NEARLY INCOMPRESSIBLE RUBBER-LIKE MATERIALS. *Int J Solids Struct*, 15, 8, 1979, 589-605.
- [4] Holzapfel, G. A. Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering Science. *Meccanica*, 37, 4 (2002), 489-490.
- [5] Mullins, L. Effect of stretching on the properties of rubber. *Journal of rubber research*, 16, 1947, 16.
- [6] Bailey, J., Sett, S. and Benko, R. J. A Fluid-Structure Interaction (FSI) Analysis of the VernaFlo Flow Control Device. In *Proceedings of the ABAQUS Users' Conference* (53, 2006).