

# **Simulation de l'écoulement d'un coulis de ciment dans les conduits de post-tension**

**Ammar Yahia\*, Tamio Yoshioka\*\*, Kamal Khayat\***

**\* Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, PQ, Canada**

**\* Laboratoire de recherche, Oriental Construction, Ltd., Japon**

## **Résumé**

Les coulis de ciment sont souvent utilisés pour la protection contre la corrosion des câbles de post-tension dans les structures. La durabilité de ces structures se trouve ainsi grandement liée, d'une part, à la qualité du coulis injecté, et d'autre part, à sa capacité d'assurer un enrobage adéquat des tendons. Le coulis doit rencontrer des caractéristiques spécifiques du point de vue de la perméabilité, de la stabilité volumétrique et de la fluidité pour assurer une protection adéquate. Un des problèmes majeurs de la durabilité des structures précontraintes par post-tension est la qualité de la protection offerte par le coulis. En effet, plusieurs cas d'inspections révèlent que, dans certains cas, des tendons sont partiellement enrobés et, dans d'autres, sont entièrement exposés. Ces défauts de mise en place proviennent soit d'un manque de stabilité du coulis, d'une mauvaise évaluation de la capacité de remplissage du coulis ou du contrôle de la qualité des travaux après injection.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'applicabilité de la dynamique des fluides pour simuler l'écoulement du coulis de ciment dans les conduits de précontrainte en utilisant la méthode des éléments finis. Un modèle numérique a été établi et a été validé sur des géométries simples. La comparaison des valeurs numériques de la pression et de la vitesse d'écoulement montre que le modèle numérique peut fournir des informations adéquates sur l'écoulement des coulis. D'autre part, l'écoulement des coulis dans des gaines paraboliques typiques dans les structures en post-tension a été simulé. L'effet de la position du tendon dans la gaine ainsi que des propriétés rhéologiques du coulis est identifié.

## **1. Introduction**

Les câbles de post-tension sont des éléments structuraux susceptibles à la corrosion qui peut affecter leur intégrité structurale. L'injection de la gaine avec un coulis de ciment est une opération nécessaire pour assurer la sécurité et l'intégrité des structures en post-tension. Le coulis de ciment agit comme barrière protectrice en enrobant les armatures de précontrainte et en les protégeant physiquement et chimiquement contre la corrosion. En effet, l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé qui confère une stabilité aux armatures de précontrainte. La durabilité de ces éléments structuraux, ainsi que celle de la structure, se trouve ainsi grandement liée, d'une part, à la qualité du coulis injecté, et d'autre part, à sa capacité d'assurer un enrobage adéquat des tendons. En effet, le coulis doit rencontrer des caractéristiques spécifiques du point de vue de la perméabilité, des changements volumétriques et de la fluidité pour assurer une protection adéquate.

Les travaux d'injection ont été toujours exécutés selon des normes bien connues en utilisant des coulis ayant des propriétés rhéologiques spécifiques. Si de nos jours l'optimisation de coulis avec des propriétés visées peut se faire d'une façon statistique rigoureuse, il n'en demeure pas moins qu'il n'existe aucune méthode rationnelle pour évaluer l'état de remplissage des gaines après injection, donc la qualité de la protection offerte aux tendons. En effet, le contrôle de la qualité des travaux d'injection est basé généralement sur le contrôle de la fluidité (mesurée par un temps d'écoulement) à l'entrée et à la sortie des gaines et sur la variation des pressions d'injection. Par exemple, une montée importante de la pression d'injection est indicateur d'un blocage du coulis pendant son injection. Suite à ces moyens de contrôle de qualité, une grande partie des travaux d'injection ont été considérés comme satisfaisants. Cependant, la rupture de quelques ponts enregistrée ces dernières années à travers le monde a généré un intérêt grandissant pour le sujet et a

soulevé un grand débat sur la durabilité des structures précontraintes en post-tension. Depuis, un grand nombre d'inspections ont été effectuées au Japon, aux États-Unis, en Belgique, en France, etc. Les inspections révèlent que l'un des problèmes majeurs de la durabilité des structures précontraintes par post-tension est la qualité de la protection offerte par le coulis [1]. En effet, plusieurs cas d'inspections révèlent que, dans certains cas, des tendons sont partiellement enrobés et, dans d'autres, sont entièrement exposés. Ces défauts de mise en place proviennent soit d'un manque de stabilité du coulis, d'une mauvaise évaluation de la capacité de remplissage du coulis ou du contrôle de la qualité des travaux après injection. Ainsi, une recommandation majeure introduite depuis est la nécessité d'effectuer des essais de convenance à grande échelle pour évaluer la capacité du coulis à enrober adéquatement les tendons [1].

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'applicabilité de la dynamique des fluides pour simuler l'écoulement du coulis de ciment dans les conduits de précontrainte en utilisant la méthode des éléments finis. Le développement d'une méthode d'évaluation fiable servira ainsi comme guide pour le choix des propriétés rhéologiques du coulis à utiliser et des paramètres d'injection (pression d'injection ou débit d'injection) à adopter.

## 2. Formulation mathématique du problème

### 2.1 Équations qui gouvernent l'écoulement

Sous des conditions normales de vitesse d'écoulement et de pression, le plus simple modèle qui puisse simuler l'écoulement d'un coulis est un modèle d'écoulement laminaire et incompressible. Par conséquent, l'écoulement laminaire et incompressible en trois dimensions (3-D) d'un coulis de ciment, dans un régime transitoire avec des surfaces libres ayant des formes arbitraires, est simulé numériquement. Le problème étudié est supposé comme isotherme, ce qui implique que le problème est indépendant de la température. Cette hypothèse est amplement justifiée en considérant que la mise en place du coulis s'effectue pendant la période dormante. Cette supposition a pour résultat l'élimination de l'équation d'énergie des équations de moment et par conséquent ces équations prennent la forme d'équations de Navier-Stokes. Les équations de transport qui gouvernent l'écoulement isotherme d'un fluide visqueux sont des équations dérivées des principes de conservations [2,3,4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot u = 0 \quad (\text{Conservation de la masse}) \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - g \right) - \nabla \cdot \tau = 0 \quad (\text{Conservation du moment linéaire}) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \end{array}$$

Les symboles  $\rho$ ,  $u$ ,  $g$ , et  $\tau$  sont respectivement la densité, le champ de vitesse, l'accélération de la pesanteur et le tenseur de contraintes de cisaillement.

Les équations gouvernant l'écoulement sont, par la suite, réduites en un system d'équations algébriques discrètes. Le système algébrique ainsi obtenu est résolu en utilisant la méthode des éléments finis. La procédure de résolution commence par une discrétisation du domaine d'écoulement en un nombre finis d'éléments de forme donnée (maillage du domaine d'écoulement). Dans chaque élément ainsi obtenu, les variables dépendantes de vitesse et de pression sont exprimées à l'aide de fonctions d'interpolation. Ces fonctions d'interpolation sont des fonctions locales à coordonnées nodales pour les éléments et les variables dépendantes.

Les surfaces libres sont caractérisées par une représentation sur le maillage de volume du fluide (volume-of-fluid, VOF). L'advection du fluide en écoulement est suivie par un traçage du volume du fluide [4]. Sur la base d'un champ de vitesse, la méthode de traçage détermine la position spatiale du fluide. D'autre part, connaissant la position spatiale du fluide, la méthode des éléments finis est, par la suite, utilisée pour prédire la cinématique du fluide. Le volume du fluide est représenté par la concentration du fluide, désignée par  $F$ . La valeur de  $F$  prend la valeur de 1 à l'intérieur de l'élément déjà balayé par le traçage et zéro à l'extérieur de l'élément en question. L'advection de la concentration du fluide est gouvernée par l'équation suivante [4]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \nabla F = 0 \quad (3)$$

La concentration  $F$  est discrétisée comme suit:

$$f_i \equiv \frac{1}{V_i} \int_{V_i} F dV_i \quad \text{pour l'élément } i \quad (4)$$

Dans ce cas, les limites d'intégration sont restreintes à l'élément  $i$  de volume  $V_i$ . Les valeurs des fonctions  $f_i$  représentent l'état de remplissage des éléments et varient de 0 à 1. Un élément dont la valeur de  $f_i$  est égale à 1 ( $f_i = 1$ ) est un élément rempli alors qu'un élément dont la valeur de  $f_i$  est égale à 0 ( $f_i = 0$ ) est considéré comme étant vide. Tout élément partiellement rempli prend une valeur de  $f_i$  entre 0 et 1.

Pour cette simulation, les coulis de ciment sont considérés comme étant des matériaux monophasiques et homogènes. D'autre part, l'écoulement du coulis est découplé de son comportement chimique, c'est-à-dire en négligeant les changements qui peuvent survenir lors de son hydratation. Cette supposition nous conduit à négliger la chaleur générée lors de l'hydratation et à éliminer ainsi le terme énergétique du système d'équations. Le coulis est supposé être un matériau visqueux, incompressible et se comporte selon un fluide de Bingham.

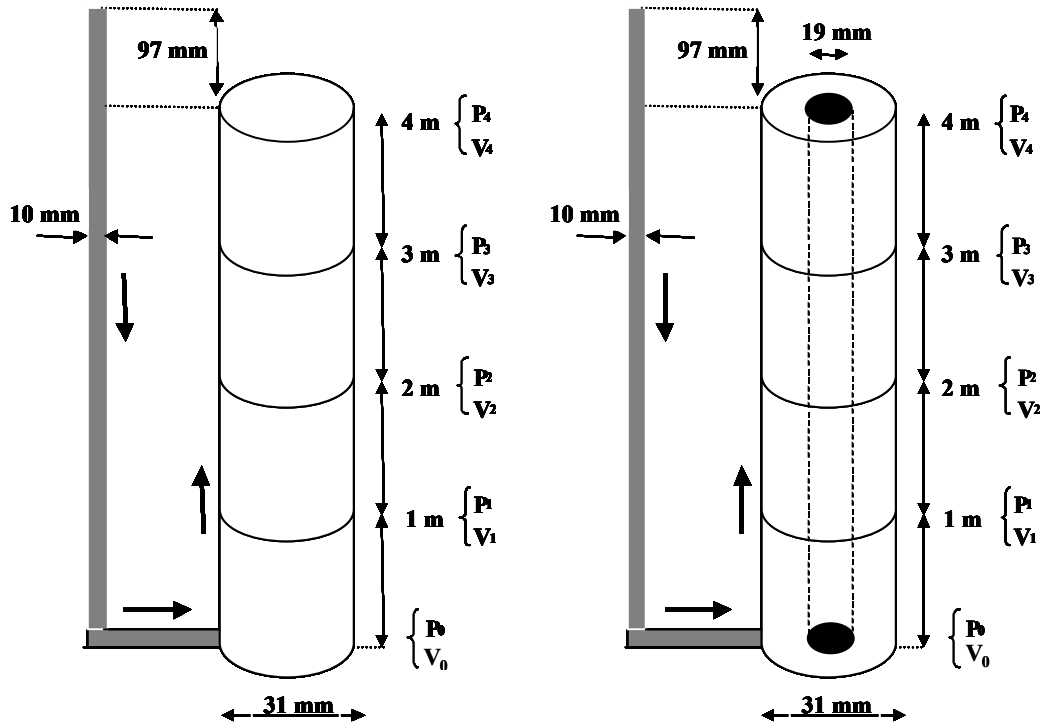
## 2.2 Conditions aux limites

Le domaine d'écoulement est compris entre la surface externe du tendon et la surface interne de la gaine. La condition aux limites de la vitesse d'écoulement consiste à assumer un écoulement sans glissement aux parois de la gaine et du tendon, ceci implique que la vitesse s'annule aux parois de la gaine et du tendon et prend une forme parabolique. Étant donné la symétrie du domaine d'écoulement par rapport à l'axe, seule une moitié du domaine est modélisé. Ceci consiste essentiellement à imposer une vitesse radiale nulle à l'axe de l'écoulement, tandis que la composante axiale de la vitesse d'écoulement est maintenue libre. Le coulis est supposé entrer dans la gaine à un débit constant (vitesse constante). De plus, par souci de simplicité, la gaine est supposée être initialement remplie sur une longueur de 100 mm. D'autre part, la concentration du fluide à l'entrée de la gaine est maintenue constante.

## 3. Validation du modèle numérique

Le modèle numérique a été validé en deux étapes: la première consiste à suivre l'écoulement d'un coulis dans des tubes et des espaces annulaires verticaux. Une comparaison entre les valeurs des vitesses d'écoulement et des pressions mesurées avec celle obtenues numériquement donne un indice sur la fiabilité du modèle. Le tube consiste en un cylindre en plastique rigide de 31 mm de diamètre intérieur ayant une surface lisse. Le système annulaire consiste à insérer une

barre d'armature de 19 mm de diamètre au centre du tube. La pression d'injection est maintenue constante durant le remplissage en contrôlant la hauteur du coulis dans la conduite d'injection. La conduite d'injection consiste en un tuyau en plastique flexible de 10 mm de diamètre. Le dispositif des tubes et espaces annulaires verticaux utilisés est montré sur la Figure 1.



**Fig. 1 – Tube et espace annulaire verticaux utilisés pour valider le modèle numérique**

D'autre part, un tube horizontal est également utilisé pour évaluer qualitativement les profils d'écoulement des coulis ayant différentes viscosités. Le dispositif consiste en un tube en plastique ayant un diamètre intérieur de 31 mm. Le coulis est injecté de sa partie supérieure. Dans cette étape, il s'agit de comparer le profil d'écoulement (pente d'écoulement) observé expérimentalement à celui obtenu numériquement.

La Figure 2 montre la variation des valeurs de pression calculées et mesurées. D'autre part, la Figure 3 présente la variation de la pente d'écoulement en fonction de la viscosité du coulis (données expérimentales et numériques).

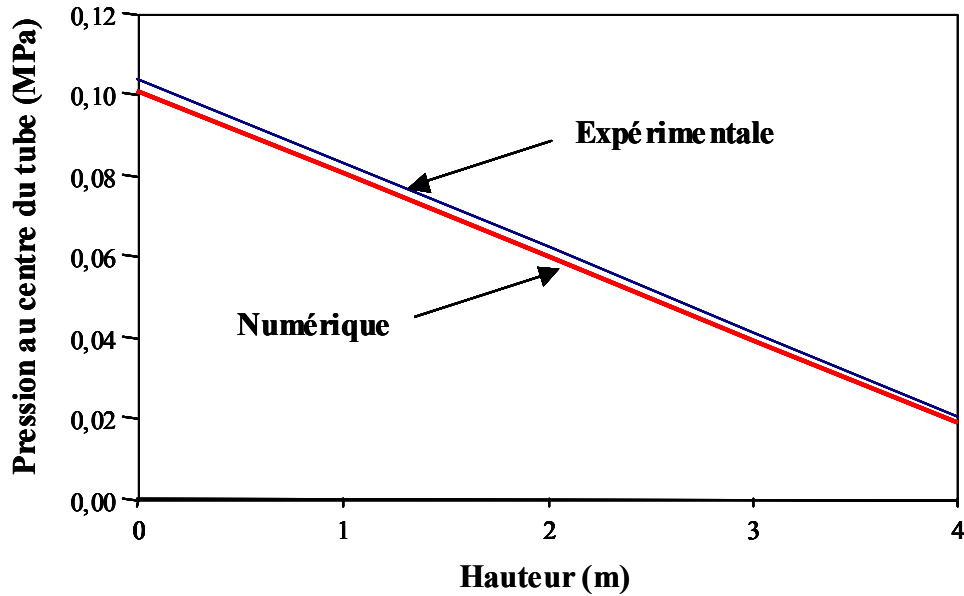


Fig. 2 – Comparaison entre les valeurs de pression mesurées et calculées

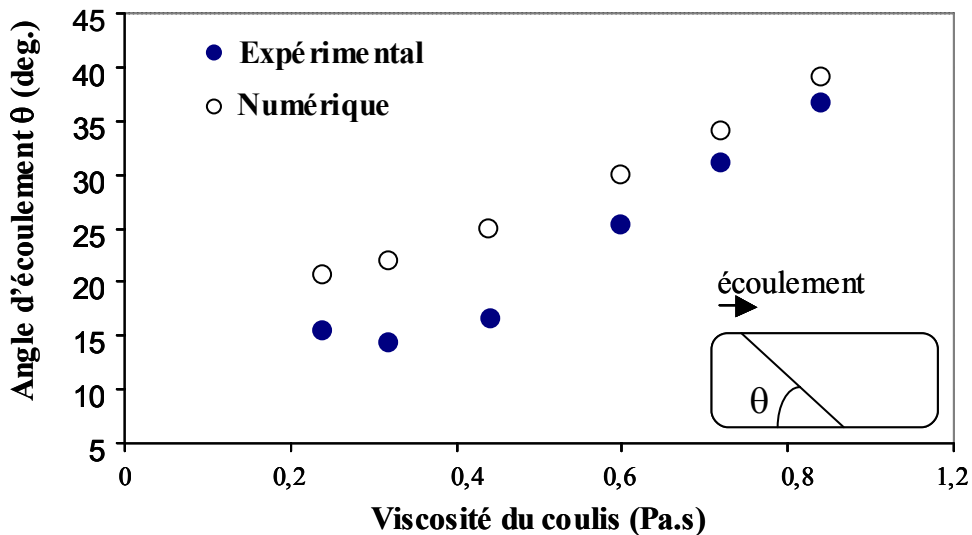


Fig. 3 – Effet de la viscosité du coulis sur le profil d'écoulement

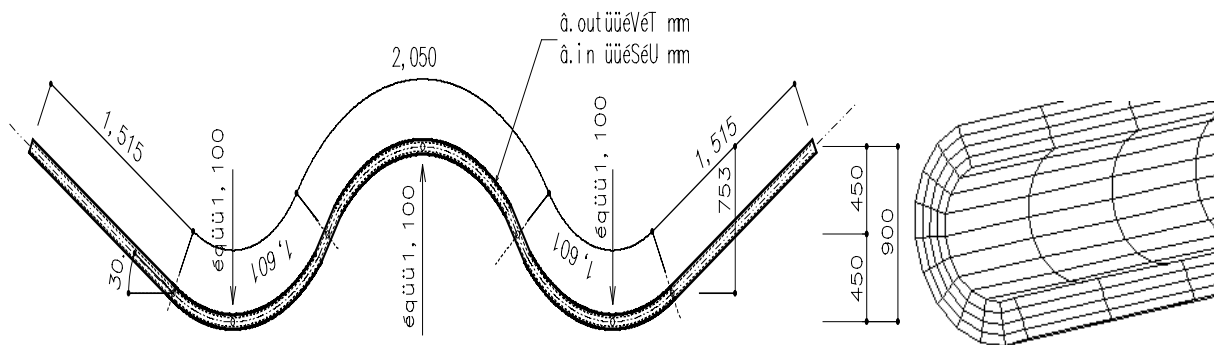
En terme de variation de la pression le long des tubes, on remarque que les valeurs numériques et expérimentales se comparent bien. La plus importante différence est observée à l'entrée du tube et ce phénomène peut être expliqué par la perturbation de l'écoulement qui peut se manifester à cet endroit. En terme de profil d'écoulement (validation de la méthode d'advection et de traçage), on remarque que, généralement, pour des coulis à faible viscosité, un écart entre les valeurs expérimentales et numériques, plus au moins important, est observé. Cet écart provient du fait que le modèle numérique considéré ne tient pas compte de la nature biphasique du coulis et par conséquent de la sédimentation qui peut survenir durant l'écoulement. Cependant, cet écart diminue au fur et à mesure que la force visqueuse augmente (augmentation

de la viscosité du coulis). L'examen de ces résultats montre que le modèle numérique fournit une bonne approximation des paramètres d'écoulement.

#### 4. Simulation des cas réels : gaine parabolique

##### 4.1 Géométrie de la gaine

Dans les structures précontraintes en post-tension, les gaines sont généralement de forme parabolique. Par exemple, le profil d'une gaine dans une poutre continue est constitué de segments de paraboles avec une forme concave à la portée et une forme convexe au support. La géométrie de la gaine considérée dans cette étude a une longueur de 7,5 m, un diamètre intérieur de 75 mm et un tendon d'acier de 46 mm de diamètre. Le domaine d'écoulement est l'espace annulaire entre la gaine et le tendon. La géométrie de la gaine modélisée dans cette étude est montrée sur la Figure 4.

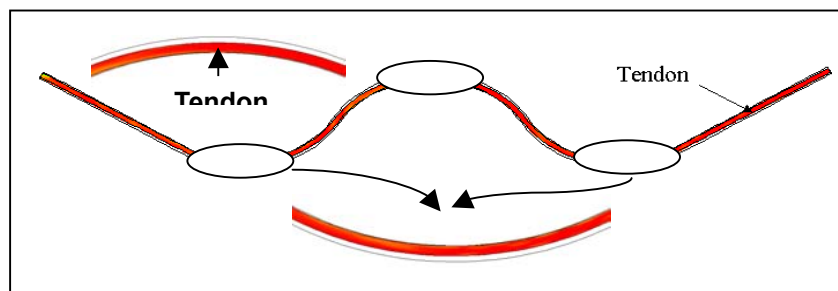


**Fig. 4 – Géométrie de la gaine et maillage de la section**

Ainsi, le domaine d'écoulement est divisé en 11 500 éléments et 9 150 noeuds. Ces paramètres ont été optimisés pour avoir un temps d'exécution raisonnable tout en assurant une stabilité et une bonne précision des valeurs numériques.

##### 4.2 Effet de la position du tendon dans la gaine sur le profil d'écoulement

Il est établi que la position du tendon dans la gaine est loin d'être au centre, mais présente une certaine excentricité. En effet, suite à sa mise en tension, le tendon présente une certaine excentricité par rapport à l'axe de la gaine (Fig. 5).

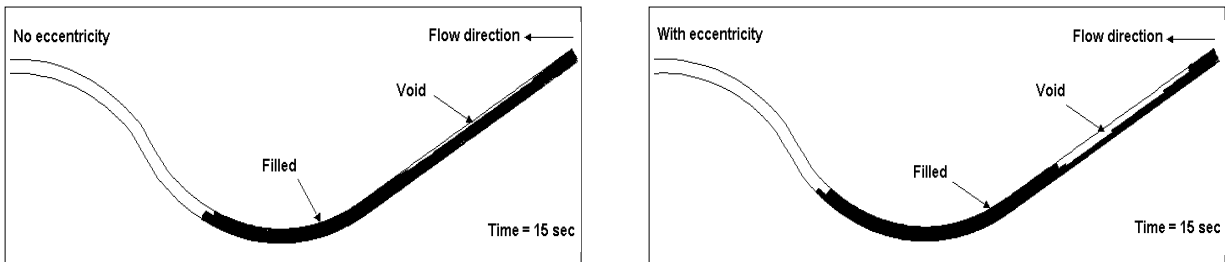


**Fig. 5 – Position du tendon à l'intérieur de la gaine**

Au niveau des segments concaves, le tendon est situé à la partie supérieure de la gaine. Par

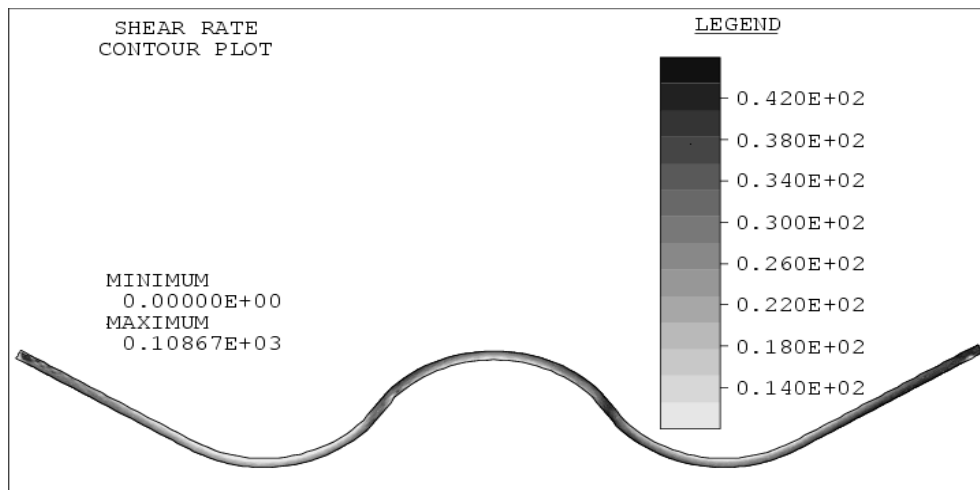
contre, dans la partie convexe, le tendon est situé en bas de la gaine. Pour des raisons mathématiques, la distance minimale entre le tendon et la gaine est fixée à 1 mm.

L'effet de l'excentricité du tendon sur le comportement du coulis lors de son écoulement est simulé en considérant un coulis ayant une viscosité plastique de 0.6 Pa.s et un seuil d'écoulement de 3,8 Pa. Le débit d'écoulement considéré est de 28 l/min, correspondant à une vitesse maximale de 10 m/min qui est généralement spécifiée durant les travaux d'injection [1]. Le profil de remplissage de deux gaines avec et sans excentricité est montré sur la figure 6. Dans la figure 7, on observe la variation du taux de cisaillement le long de la gaine.



**Fig. 6 – Effet de l'excentricité du tendon sur le profil d'écoulement du coulis**

L'excentricité du tendon à l'intérieur de la gaine résulte en un profil d'écoulement et de remplissage différent de celui où le tendon est situé au centre de la gaine. Cette situation peut être due à deux choses: l'effet de l'importance de la force d'inertie par rapport à la force visqueuse et, de l'autre côté, à la position du tendon. En effet, dans la première partie concave de la gaine le tendon est à la partie supérieure de la gaine. Ceci crée une zone restreinte pour le passage du coulis ce qui retarde le remplissage de la partie supérieure. Par contre, dans le cas où le tendon est centré dans la gaine, la présence de vide à la partie supérieure de la première partie concave est due uniquement à l'importance des forces d'inertie par rapport à la force visqueuse. Ceci est prouvé par l'utilisation de coulis ayant une plus grande viscosité (augmentation des forces visqueuses) ce qui résulte en une diminution de la pente d'écoulement.



**Fig. 7 – Taux de déformation correspondant à une position excentrique du tendon**

Comme on peut le voir sur la Figure 7, le coulis est soumis à un taux de cisaillement plus faible dans les zones où le tendon présente une distance minimale avec la gaine (zone restreinte). Ceci peut ainsi résulter en un mauvais remplissage de ces zones. D'autre part, dans les zones non restreintes où le coulis est soumis soit à une accélération (effet d'inertie dans une zone descendante) ou une augmentation de la pression (zone ascendante), le coulis est soumis à un taux de cisaillement plus important. Cette différentielle du taux de cisaillement couplé avec l'effet de filtration dû à l'espace entre les fils de précontrainte peut avoir un effet sur la stabilité du coulis. En effet, les coulis de ciment sont des matériaux pseudoplastiques qui se caractérisent par une diminution de la viscosité avec le taux de déformation et une diminution de la résistance du coulis à la sédimentation et au ressuage. La présence de zones avec un taux de déformation élevé peut augmenter le risque d'instabilité du coulis (ressuage et sédimentation). La connaissance de ces endroits peut aider, par exemple, à identifier les bons endroits pour l'emplacement d'évents d'échappement d'air et des eau aux de ressuage. Ceci peut ainsi aider à éviter la formation de vides à l'intérieur de la gaine.

Le modèle numérique a également été utilisé pour évaluer l'effet de la viscosité du coulis sur les pressions d'injection nécessaires pour maintenir un débit d'écoulement donné. Les résultats obtenus montrent que la pression d'injection augmente avec la viscosité du coulis, ce qui est en bonne concordance avec l'expérience.

## 5. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce programme de recherche en cours est de développer une méthode efficace et économique pour pouvoir ajuster les paramètres d'injection et évaluer la performance de coulis ayant des propriétés spécifiques à remplir adéquatement les gaines de post-tension. Les résultats qui viennent d'être présentés montrent que les simulations numériques peuvent reproduire les observations du laboratoire. De plus, la comparaison des valeurs numériques et celles mesurées au laboratoire sur des géométries simples montre que le modèle numérique peut donner des approximations très acceptables. En ce qui concerne les gaines de forme parabolique, le modèle numérique est exploité pour visualiser le profil d'écoulement ou pour reproduire des phénomènes déjà connus. Bien sûr, le travail n'est pas achevé et des études de validation seront entreprises par la suite pour parvenir à une modélisation fiable et efficace.

La simulation de l'écoulement de coulis dans les gaines de post-tension peut être un outil efficace pour comprendre les facteurs affectant la procédure d'injection ainsi que les mécanismes mis en jeu. La simulation de l'écoulement tridimensionnelle a permis de reproduire le profil de remplissage. De plus, les simulations ont permis de mettre en évidence l'effet de la position excentrique du tendon à l'intérieur de la gaine. Il est ainsi montré que la présence d'excentricité dans la gaine résulte en un champ non uniforme des taux de déformation. Ceci peut avoir un effet direct sur la stabilité du coulis lors de son écoulement. De plus, l'augmentation de la pression d'injection, pour maintenir un débit constant lors de l'injection, suite à une augmentation de la viscosité du coulis est bien reproduit dans le cas des gaines paraboliques.

## Références

- [1] The Concrete Society/Concrete Bridge development Group, "Durable Bonded Post-Tensioned Concrete Bridges," Technical Report No 47, The Concrete Society, 1996, 64 p.
- [2] Batchelor, G.K., "An Introduction to Fluid Dynamics," Cambridge University Press.
- [3] Gresho, P.M., Sani, R.L., "Incompressible Flow and the Finite Element Method. Volume 2: Isothermal Laminar Flow," John Wiley and Sons, LTD.
- [4] FIDAP Users Manual, Fluent Corporation.