

Écoulement dans la cellule principale

Comme nous l'avons suggéré lors des premières observations concernant les écoulements confinés (voir Chapitre 3), la forme de l'interface fluide aqueux/huile (Figure 81), représente une mesure du niveau de « pénétration » du fluide déplaçant. Dans ce chapitre nous étudions l'impact de différentes propriétés rhéologiques sur la forme de cette interface. L'objectif est évidemment d'établir si éventuellement les contraintes normales ou une autre caractéristique liée à la viscoélasticité du fluide sont à l'origine d'une meilleure ou moins bonne pénétration, ce qui suggérerait une explication à la diminution de la saturation d'huile dans les opérations de *polymer flooding* mentionnées dans le chapitre 1.

Dans ce chapitre nous étudions d'abord en détail l'écoulement de différents types de matériau dans une cellule simple. Nous montrons que les profils de l'interface dépendent des propriétés rhéologiques de la phase déplaçante, et que les propriétés interfaciales ne jouent pas un rôle majeur dans la forme stationnaire. Nous nous intéressons ensuite à l'écoulement dans une restriction, et présenterons un essai d'écoulement à plus petite échelle, en microsysteme.

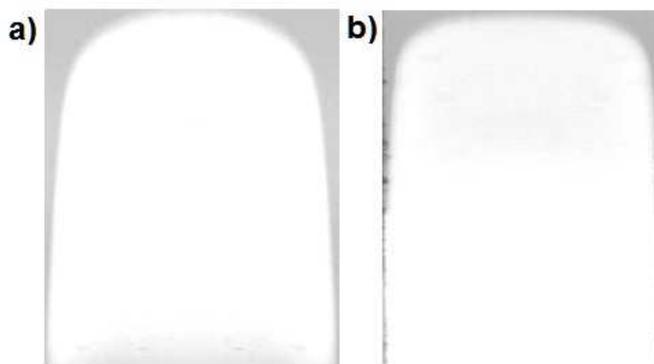


Figure 81: Différence de forme de l'interface lors des expériences de déplacement à $Q = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ entre **a)** Canadou ($\eta = 0,16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) et **b)** PAM-6000 ($\eta = 0,16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Le fluide déplacé est l'huile de silicone ($\eta = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

4.1.1 Etablissement de la forme de l'interface

Il est d'abord essentiel de déterminer la distance nécessaire pour l'établissement d'une forme caractéristique de l'interface quand différentes formulations viscoélastiques ou un fluide newtonien déplacent l'huile silicone. La Figure 82 montre les différentes étapes de la déformation de l'interface. Initialement cette interface est à peu près droite (la forme dépend en fait des conditions de mise en place). Puis cette interface est déformée au fur et à mesure que le fluide déplaçant avance dans la cellule. Après un certain temps t_s et une distance h_s il semble que sa forme devient à peu près constante dans le plan xy . Dans la suite nous utilisons deux techniques différentes pour observer les variations de ce profil au cours de l'avancement. La première consiste à comparer la forme des profils pour obtenir la vitesse de l'interface à partir du point de l'interface située au milieu de la largeur, la seconde consiste à calculer la vitesse d'avancement de toute l'interface.

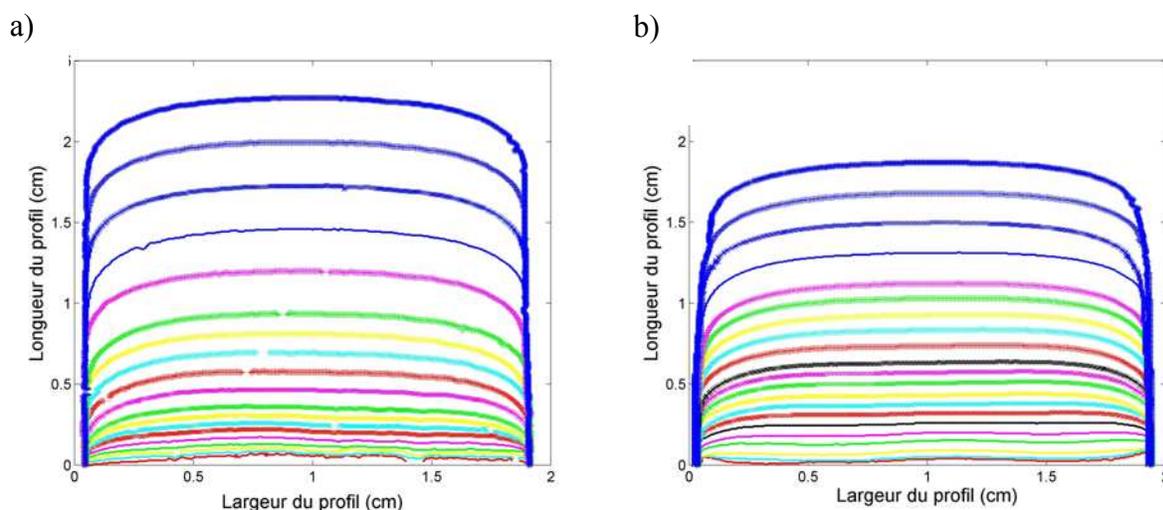


Figure 82 : Profils de l'interface au cours du temps à $Q = 0,4 \text{ cm}^3/\text{s}$ pour deux fluides : **a)** Canadou ($\eta = 0,16 \text{ Pa.s}$) et **b)** PAM-6000 ($\eta = 0,26 \text{ Pa.s}$). Le fluide déplacé est l'huile de silicone ($\eta = 0,1 \text{ Pa.s}$).

Une première approche consiste donc à observer globalement la vitesse de déplacement du front de l'interface au cours du temps en fonction du point de l'interface situé au milieu de la largeur. Pour cela, il suffit de calculer la vitesse de déplacement de ce point entre deux profils ($v = \Delta y / \Delta t$). Si après un temps t_i et une position h_i les profils suivants se superposent au profil **i** et si la forme de l'interface ne bouge plus, on peut alors statuer que l'interface se déplace globalement à vitesse constante et nous considérons que

$t_s = t_i$ et $h_s = h_i$. En appliquant cette méthode (profils en bleu, dans la partie supérieure de la Figure 82) on obtient les valeurs ci-dessous (voir Tableau 13) pour le fluide newtonien et les deux formulations viscoélastiques. L'équilibre est atteint quelle que soit la nature du fluide déplaçant. Ceci nous permet donc de définir une vitesse de propagation du profil le long de la cellule. Dans la suite nous utiliserons cette valeur pour décrire la vitesse de l'écoulement considéré.

Fluide Déplaçant	Canadou		PAM-4000		PAM-6000	
	$v_{\hat{f}_i} = 1$ cm/s	$v_{\hat{f}_i} = 5$ cm/s	$v_{\hat{f}_i} = 1$ cm/s	$v_{\hat{f}_i} = 5$ cm/s	$v_{\hat{f}_i} = 1$ cm/s	$v_{\hat{f}_i} = 5$ cm/s
t_s (s)	3.75	2	4.25	2.2	4.5	2.4
h_s (cm)	1.3	2.6	1.25	2.9	1.2	3

Tableau 13 : Temps et hauteur de stabilisation dans la cellule pour différents fluides

Dans une deuxième approche, nous nous intéressons aux évolutions de la forme de toute l'interface au cours du temps. Une vitesse de propagation de l'interface (v_{yx_i}) peut être calculée à partir de deux images consécutives. La vitesse de plusieurs points de l'interface est calculée le long de l'axe x avec l'équation suivante :

$$v_{yx_i} = \frac{h^*_{(i)} - h^*_{(i-1)}}{t^*_{(i)} - t^*_{(i-1)}} \quad \forall y = h^*; \quad 0cm < x < 2cm; \quad t_{xy} = \frac{t^*_{(i)} + t^*_{(i-1)}}{2} \quad (4.1)$$

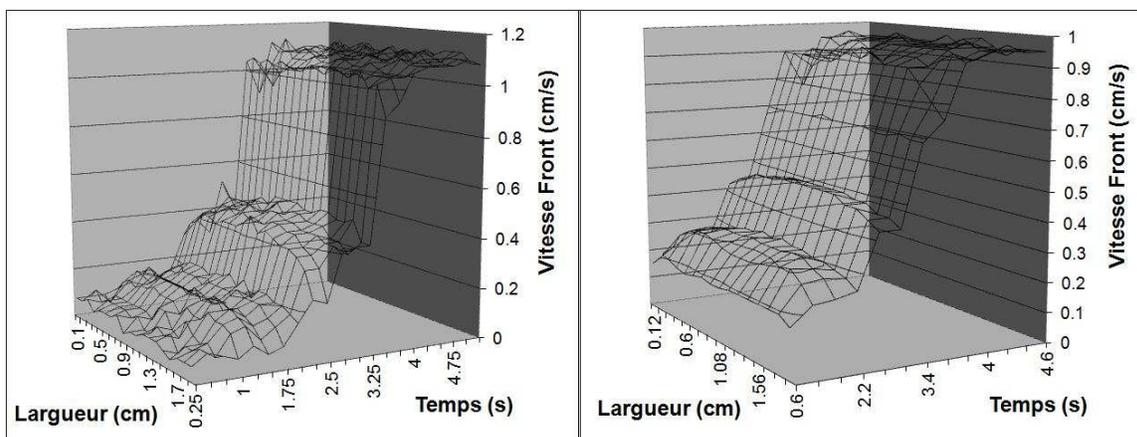


Figure 83 : À gauche, vitesse de propagation de l'interface Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) à $Q=0,4$ cm³/s. À droite, vitesse de propagation de l'interface PMA-6000 ($\eta=0,26$ Pa.s)/huile silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) à $Q=0,4$ cm³/s. Vitesse du front en fonction du temps et de la position sur la largeur de la cellule.

Nous constatons que la vitesse commence par augmenter rapidement puis se stabilise (plateaux de la Figure 83), fait que nous allons reprendre dans la discussion. En conséquence, nous considérons que la stabilisation est constatée sur toute la largeur de la cellule, car toute l'interface (et pas seulement le front de l'interface) se déplace à la même vitesse au-delà de la distance de stabilisation.

A faible débit h_s est essentiellement la même pour tous les systèmes. Cependant, les formulations élastiques se stabilisent à une distance plus grande par rapport au fluide newtonien quand le débit imposé est plus grand. C'est donc avec la formulation PAM-6000 que les distances de stabilisation sont les plus élevées. Les valeurs correspondantes en fonction de la vitesse sont montrées dans le Tableau 14. En pratique, en n'utilisant que les données de profils mesurés au-delà des distances observées pour ce fluide nous avons l'assurance d'être dans une zone stationnaire quel que soit le fluide (parmi ceux que nous avons utilisés).

v_{fi} (cm/s)	h_s (cm)
1	1,2
5	3
8	3,9
15	5,7
20	6,8

Tableau 14 : Hauteur de stabilisation pour la formulation PAM-6000 en fonction de la vitesse de front imposée.

Puisque dans la suite ce ne sont pas les vitesses que nous allons utiliser pour l'analyse des données mais les profils, il est intéressant de confirmer le résultat à partir des profils. Ceci permettra donc de vérifier que le profil constitué dans la partie inférieure de la cellule reste inchangé sur toute sa longueur, c'est-à-dire qu'il n'est pas perturbé par des effets produits à la sortie de la cellule ou simplement par le fait que la distribution des fluides dans la cellule change au cours de l'avancement du front puisque l'huile disparaît progressivement.

Plusieurs profils sont enregistrés dans une fenêtre d'observation placée au-delà de h_s . Ces profils d'interface, pris à différentes hauteurs dans la cellule, ont été déplacés, superposés et représentés dans la Figure 84 et Figure 85. Pour cela, nous avons utilisé comme référence le sommet de chaque profil et placé toutes les images dans une même figure dont la référence est ce point maximum.

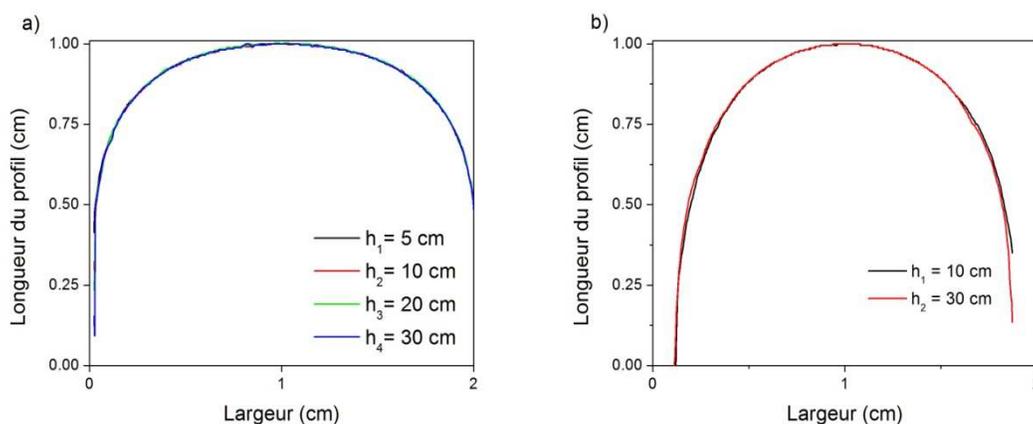


Figure 84 : Superposition des images du profil de l'interface Canadou ($\eta=0,16 \text{ Pa.s}$)/huile Silicone ($\eta=0,1 \text{ Pa.s}$) prises à différentes hauteurs de la cellule : a) $Q=0,4 \text{ cm}^3/\text{s}$ b) et $Q=2 \text{ cm}^3/\text{s}$.

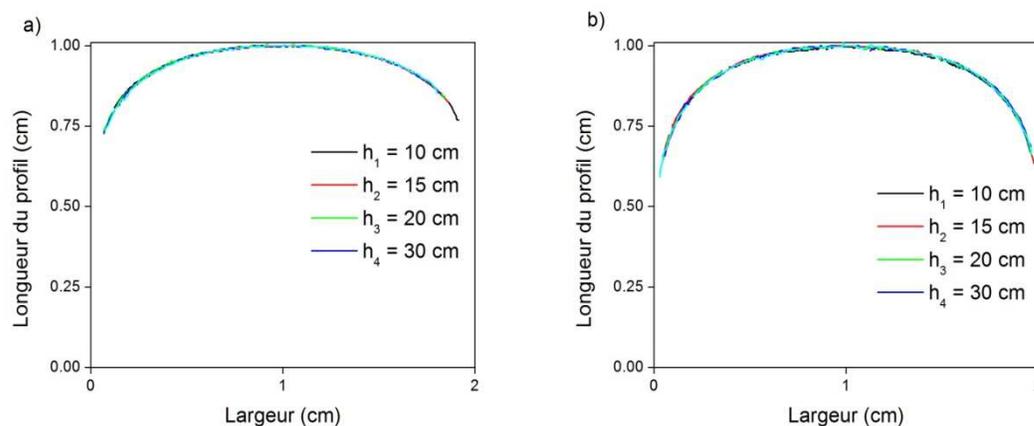


Figure 85 : Superposition des images du profil de l'interface PMA-6000/huile Silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) prises à différentes hauteurs de la cellule : **a)** $Q=0,4$ cm³/s avec $\eta=0,16$ Pa.s et à **b)** $Q=2$ cm³/s avec $\eta=0,16$ Pa.s.

Les résultats obtenus dans les deux cas « extrêmes » (fluide newtonien et PAM-6000) (voir Figure 84 et Figure 85) montrent que les profils observés au-delà de la distance h_s sont bien stationnaires le long de la cellule. Le même résultat est obtenu pour tous les autres fluides et toutes les vitesses. En revanche la forme du profil stationnaire dépend bien sûr du type de fluide et de la vitesse. Dans la suite nous utilisons ce profil stationnaire comme référence et discutons de ses variations en fonction de la vitesse et des propriétés physiques des deux fluides.

4.1.2 Influence de la vitesse

Examinons d'abord l'impact de la vitesse sur la forme du profil. Pour cela on peut s'intéresser aux caractéristiques observées dans le cas d'un fluide déplaçant newtonien, car les tendances globales sont générales, même si, comme on le verra, il y a des différences dans les évolutions en fonction des propriétés rhéologiques des fluides.

On constate (voir Figure 86) qu'à faible vitesse le profil est très plat, puis il s'arrondit progressivement et relativement fortement aux fortes vitesses. Cependant, au-delà d'une vitesse critique (autour de 20cm/s pour l'expérience de la Figure 86) le profil devient instable, sa forme n'est plus régulière et les mesures peu reproductibles.

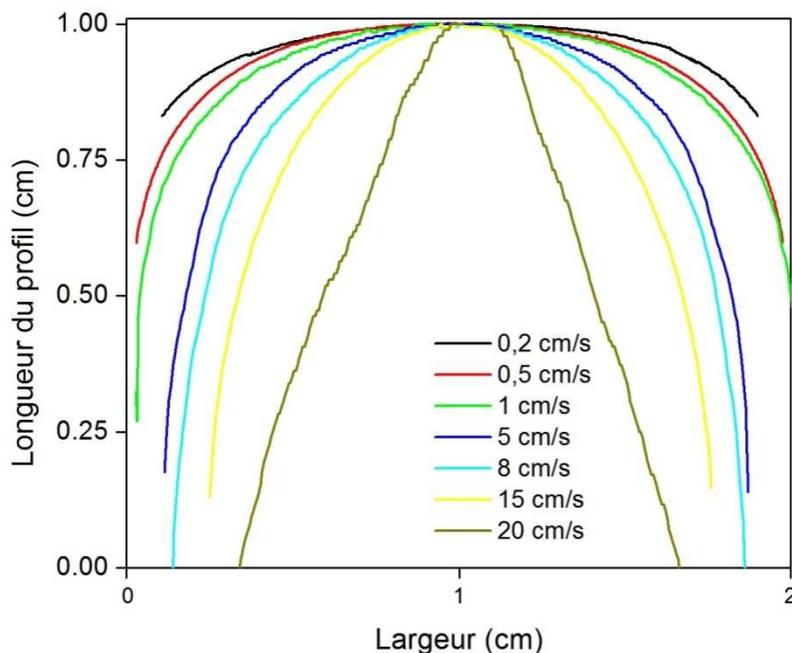


Figure 86 : Profils de l'interface Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) entre 0,1 cm/s (noir) et 20 cm/s (doré).

4.1.3 Impact de la viscosité des fluides

Comme la viscosité apparente des différents fluides viscoélastiques utilisés varie légèrement d'un fluide à un autre en dépit du fait que nous avons essayé de la fixer à une valeur donnée (légèrement supérieure à celle de l'huile déplacée) il est intéressant d'observer l'impact de la viscosité du fluide déplaçant sur la forme du profil. Pour cela nous nous plaçons d'abord dans le cas de fluides newtoniens. D'après les résultats de la Figure 86 on peut se focaliser simplement sur le profil à 5cm/s qui est bien représentatif de la forme de l'interface entre deux tels fluides, puisqu'il correspond à un régime où l'interface est bien courbée, sans être encore affectée par l'instabilité aux fortes vitesses. On constate alors que multiplier la viscosité par 2 ne change pas la forme de cette interface (voir Figure 87).

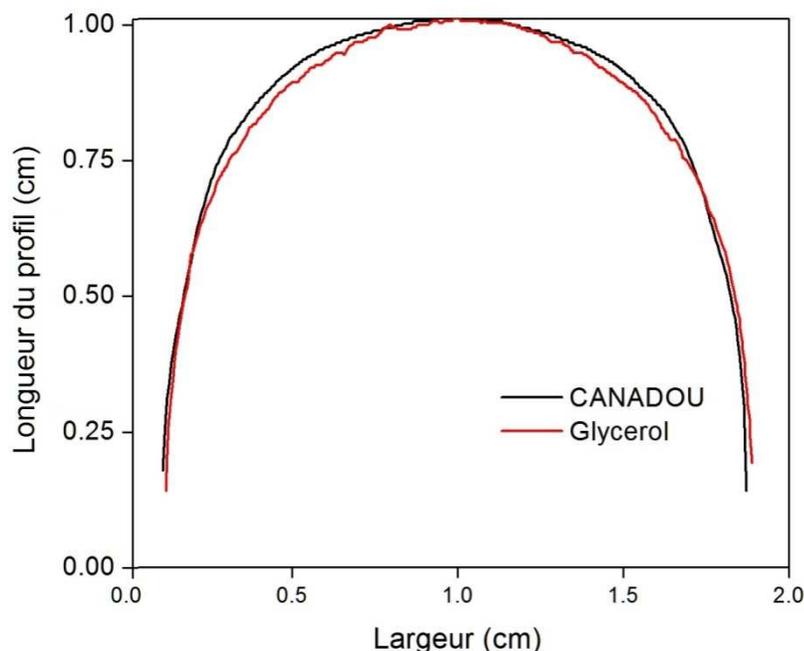


Figure 87 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta = 0,16$ Pa.s) et Glycérol 85 % ($\eta = 0,34$ Pa.s) à $v_{fi} = 5$ cm/s. Le fluide déplacé est l'huile de silicone ($\eta = 0,1$ Pa.s)

Comme une partie de nos fluides viscoélastiques présentent également des propriétés rhéofluidifiantes il est intéressant d'étudier l'impact de la rhéofluidification seule sur le profil de l'interface. Pour cela nous avons utilisé du Xanthane, fluide rhéofluidifiant mais aux propriétés viscoélastiques négligeables. Comme nous pouvons le constater sur la Figure 88, le fait d'avoir un fluide rhéofluidifiant déplaçant ne modifie pas la forme de l'interface. Dans chaque expérience la viscosité apparente du Xanthane a été calculée avec la loi de comportement obtenue dans la section 6.4.

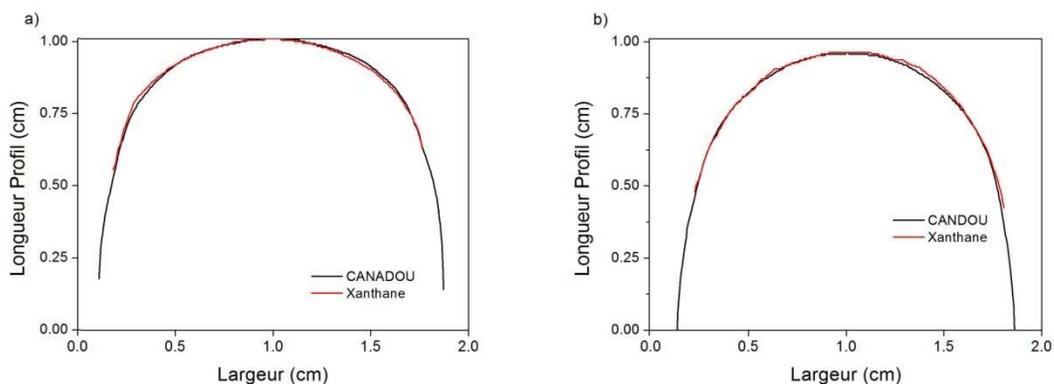


Figure 88 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) et XAN-5000/huile de silicone avec **a)** $v_{fi}=5$ cm/s, $\eta_{XAN-5000}= 0,06$ Pa.s, $\eta_{Huile}= 0,005$ Pa.s et **b)** $v_{fi}=8$ cm/s, $\eta_{XAN-5000}= 0,035$ Pa.s, $\eta_{Huile}= 0,005$ Pa.s.

4.1.4 Impact du caractère viscoélastique du fluide

Examinons maintenant les résultats obtenus avec la formulation PAM-4000. Les différences avec le fluide newtonien sont peu sensibles aux faibles vitesses (voir Figure 89a), c'est-à-dire en-dessous de 1cm/s. Des différences sensibles dans la forme des profils apparaissent pour des vitesses plus élevées : les profils du fluide newtonien sont plus courbés que ceux du fluide viscoélastique (voir Figure 89b,c,d). L'écart entre les deux profils s'accroît lorsque la vitesse augmente.

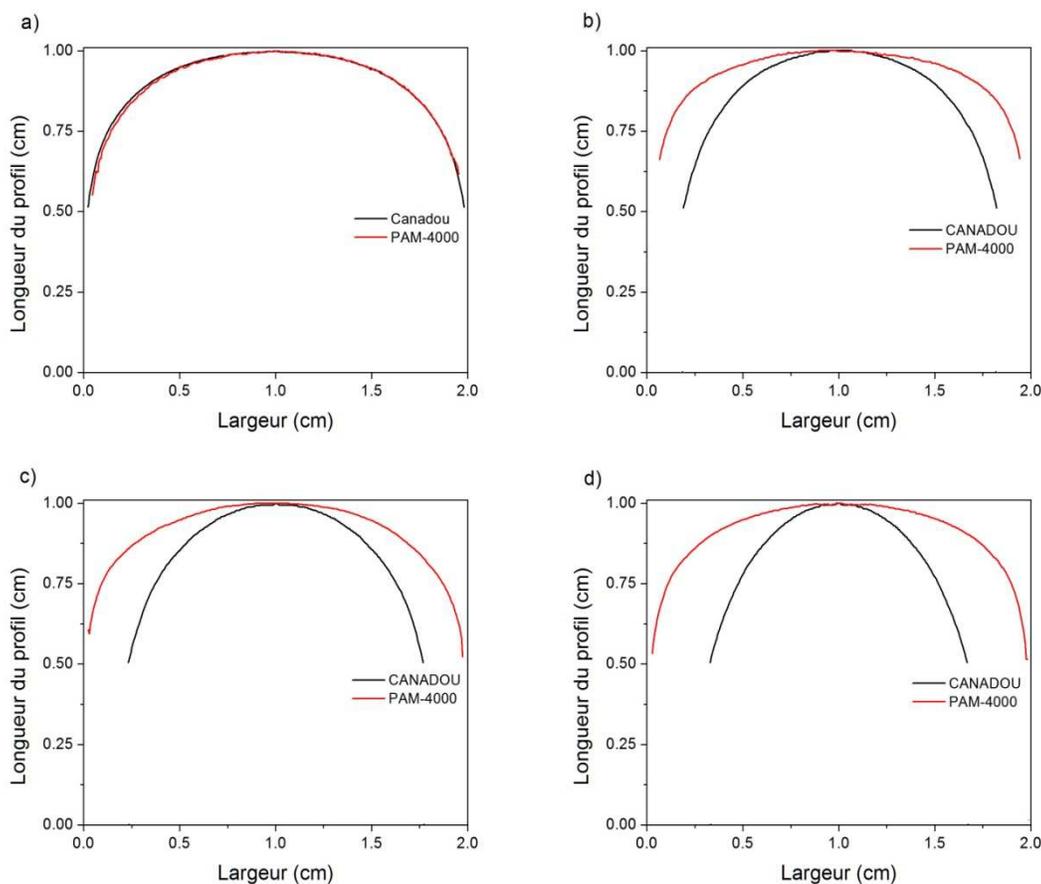


Figure 89 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta= 0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta= 0,1$ Pa.s) et PAM-4000/huile de silicone. **a)** $v_{fi}=1$ cm/s, $\eta_{PAM-4000}= 0,13$ Pa.s, $\eta_{Huile}= 0,1$ Pa.s, **b)**

$v_{fi} = 5 \text{ cm/s}$, $\eta_{\text{PAM-4000}} = 0,095 \text{ Pa.s}$, $\eta_{\text{Huile}} = 0,005 \text{ Pa.s}$, **c)** $v_{fi} = 8 \text{ cm/s}$, $\eta_{\text{PAM-4000}} = 0,086 \text{ Pa.s}$, $\eta_{\text{Huile}} = 0,005 \text{ Pa.s}$ **d)** $v_{fi} = 15 \text{ cm/s}$, $\eta_{\text{PAM-4000}} = 0,076 \text{ Pa.s}$, $\eta_{\text{Huile}} = 0,005 \text{ Pa.s}$.

Pour la formulation PAM-6000, on observe une différence entre les deux profils à partir d'une vitesse un peu plus faible que pour le PAM-4000, puisqu'à 1cm/s on voit déjà un décalage entre les deux profils (newtonien / viscoélastique) (voir Figure 90b) (alors qu'à cette même vitesse 1cm/s on n'observait pas de différences entre les profils pour le PAM-4000). Ensuite l'écart entre les profils des deux fluides augmente avec la vitesse (voir Figure 90) de la même façon que pour le PAM-4000. Cependant, pour une vitesse donnée identique, l'écart avec le profil obtenu avec un fluide newtonien est plus important pour le PAM-6000 que pour le PAM-4000.

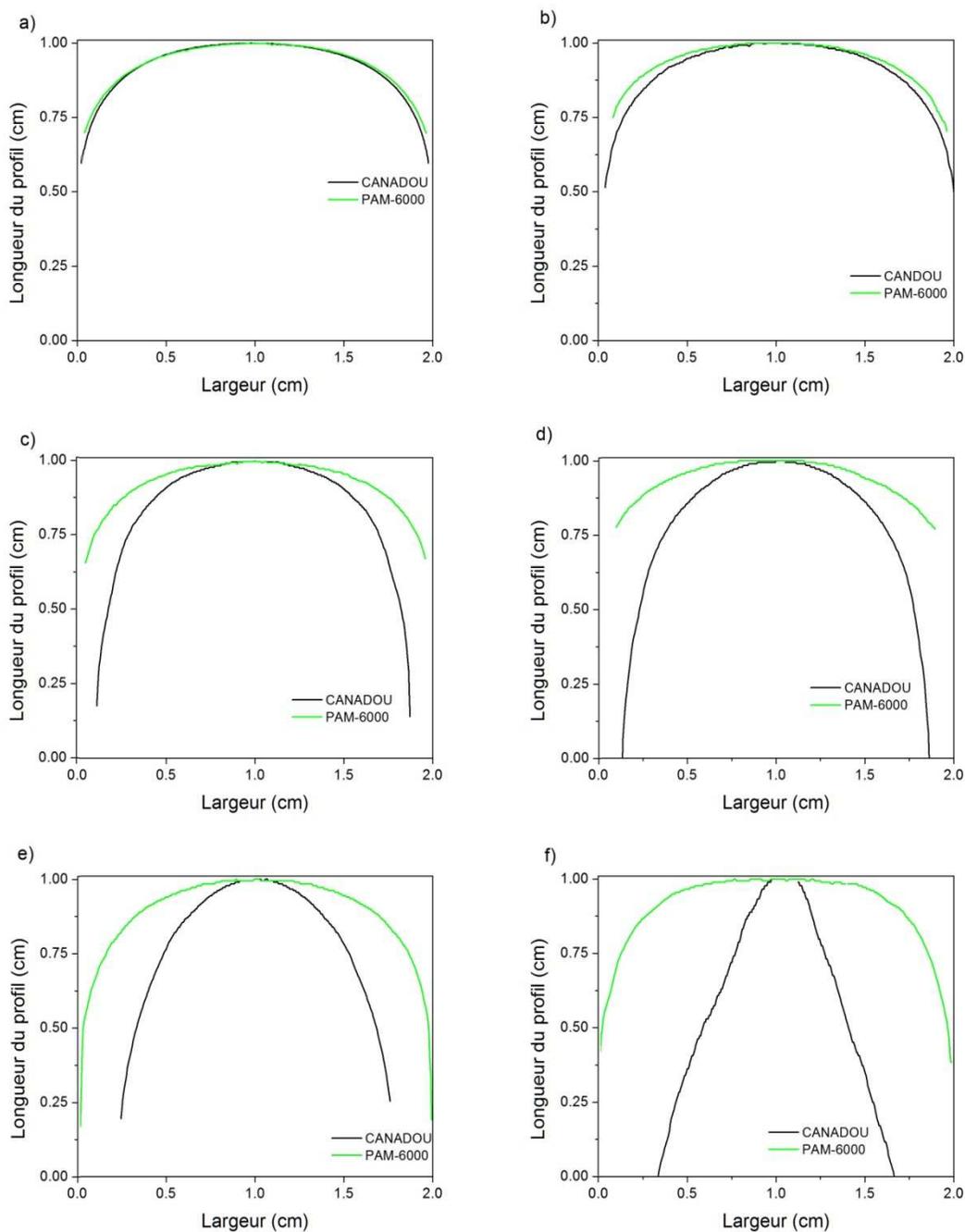


Figure 90 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta = 0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta = 0,1$ Pa.s) et PAM-6000/huile de silicone. **a)** $v_{fi} = 0,5$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,32$ Pa.s, **b)** $v_{fi} = 1$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,26$ Pa.s **c)** $v_{fi} = 5$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,16$ Pa.s, **d)** $v_{fi} = 8$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,14$ Pa.s, **e)** $v_{fi} = 15$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,12$ Pa.s et **f)** $v_{fi} = 20$ cm/s, $\eta_{\text{PAM-6000}} = 0,1$ Pa.s, $\eta_{\text{Huile}} = 0,005$ Pa.s.

Pour les fluides viscoélastiques on peut constater un fait remarquable : au-delà d'une certaine vitesse la forme de l'interface est constante comme on peut le voir sur le Figure 91 et le Figure 92.

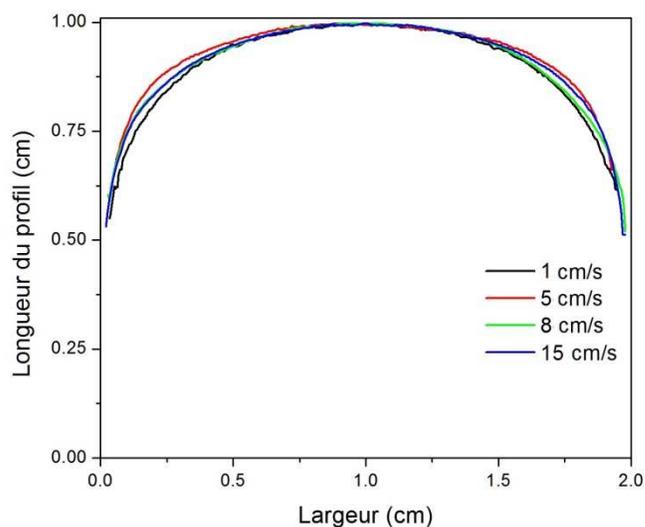


Figure 91 : Profils de la PAM-4000/huile silicone entre 1 cm/s et 15 cm/s.

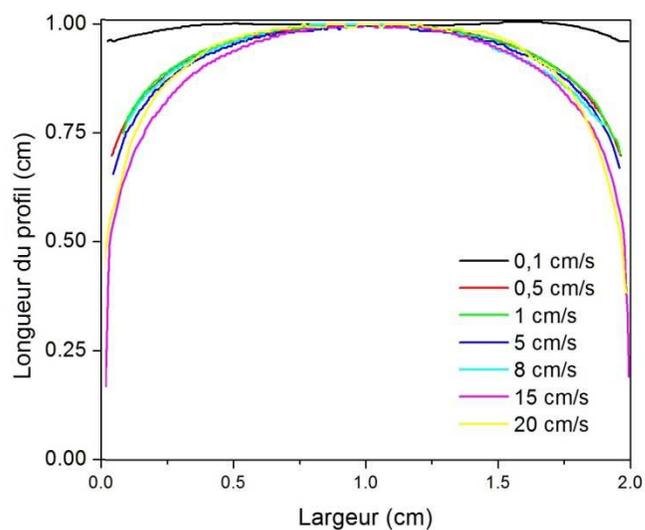


Figure 92 : Profils PAM-6000/huile de silicone entre 0,1 cm/s et 20 cm/s.

Les expériences avec le PEG PEO donnent des résultats qualitativement analogues. On constate de même que les profils entre fluide déplaçant newtonien et fluide déplaçant viscoélastique s'écartent l'un de l'autre lorsque la vitesse dépasse une valeur critique (voir Figure 93 et Figure 94), et le profil du fluide viscoélastique atteint une forme stationnaire (voir Figure 95) au-delà d'une vitesse critique. Cependant on remarque ici que la vitesse critique n'est pas la même selon les fluides utilisés : de l'ordre de 1 cm/s pour le PEG PEO 800 et de l'ordre de 5 cm/s pour le PEG PEO 2000. Elle est donc plus élevée pour le PEG PEO 2000 que pour le PEG PEO 800, ce qui suggère que cette vitesse critique doit varier avec l'importance des effets viscoélastiques.

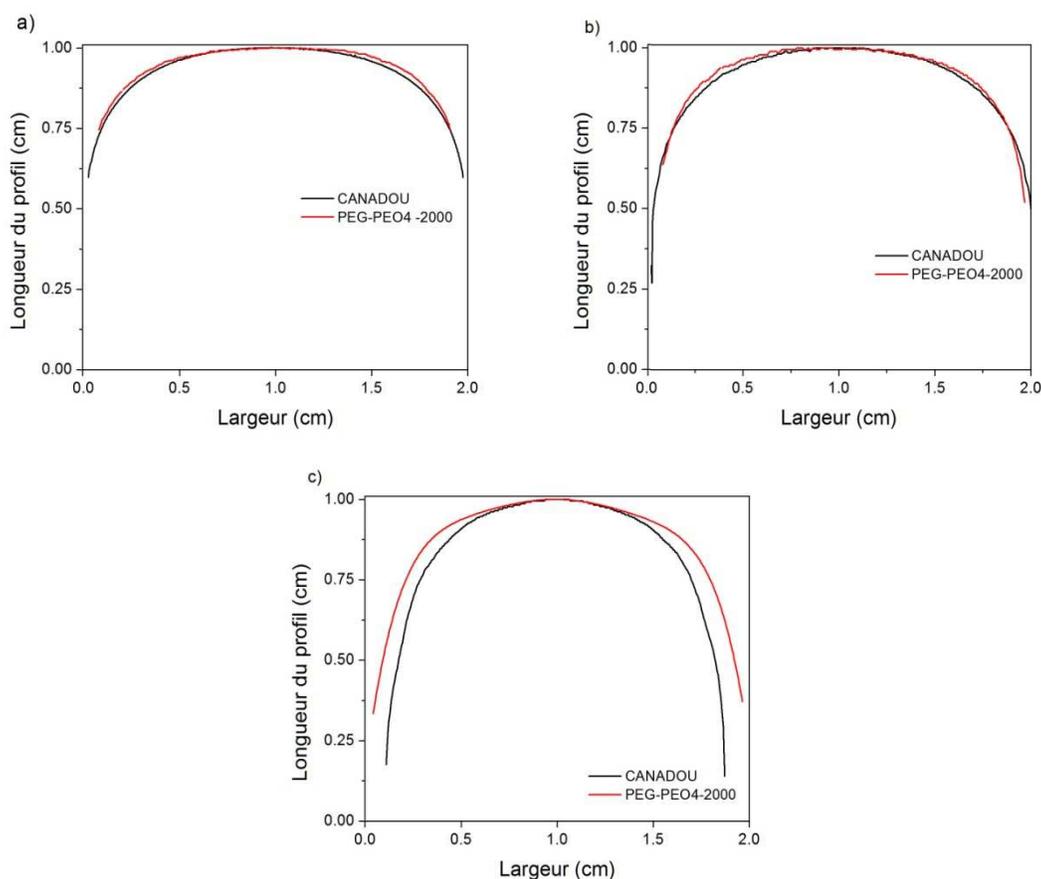


Figure 93 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) et PEG-PEO4-2000 ($\eta=0,26$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) **a)** $v_{fi}=0,5$ cm/s, **b)** $v_{fi}=1$ cm/s et **c)** $v_{fi}=5$ cm/s.

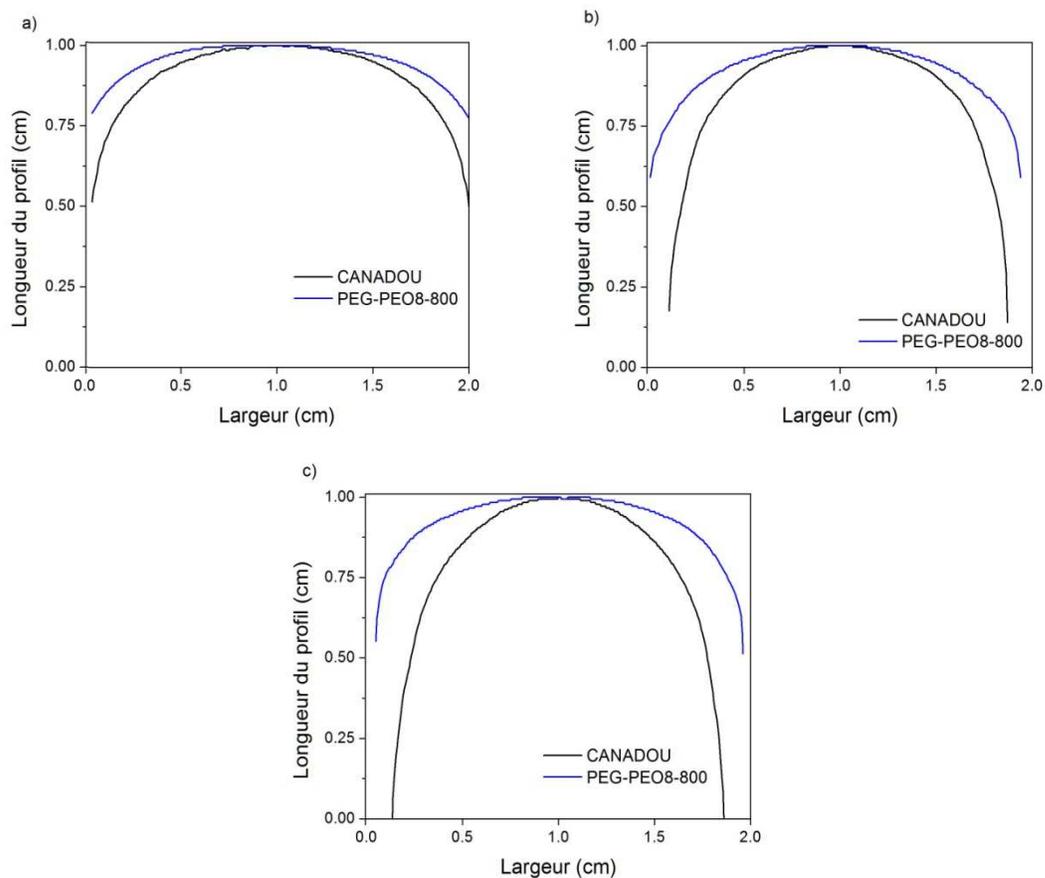


Figure 94 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) et PEG-PEO8-800 ($\eta=0,26$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) **a)** $v_{fi}=1$ cm/s, **b)** $v_{fi}=5$ cm/s et **c)** $v_{fi}=8$ cm/s.

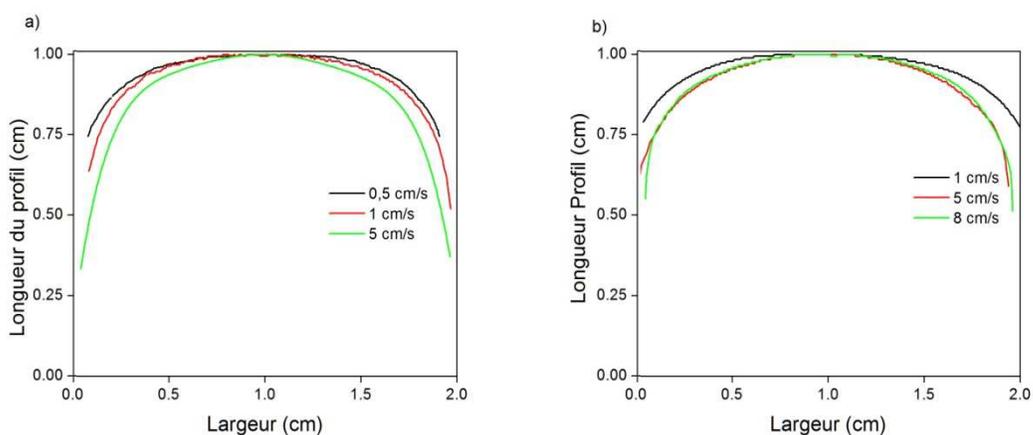


Figure 95 : Profils de l'interface des formulations PEG-PEO. **a)** PEG-PEO4-2000/huile silicone entre 0,5 cm/s et 5 cm/s. **b)** PEG-PEO8-800/huile silicone entre 1 cm/s et 8 cm/s.

Nous avons ensuite réalisé des expériences à $v_{fi}=5$ cm/s, suffisamment élevé pour constater des effets élastiques que nous avons constatés dans les figures précédentes, avec des formulations PEG-PEO4 de concentration variant dans une large gamme (voir section 7.5.2). Nous constatons alors (voir Figure 96) que le profil est d'autant plus courbé que la concentration en PEO 4 10^6 g/mol est faible, autrement dit la stabilisation du profil sur une forme peu courbée intervient à des vitesses plus faibles, ou bien, et c'est l'hypothèse que nous retiendrons pour l'instant (nous revenons sur cette hypothèse dans le paragraphe suivant), la forme stabilisée du profil de l'interface est d'autant plus courbée que les effets viscoélastiques sont importants.

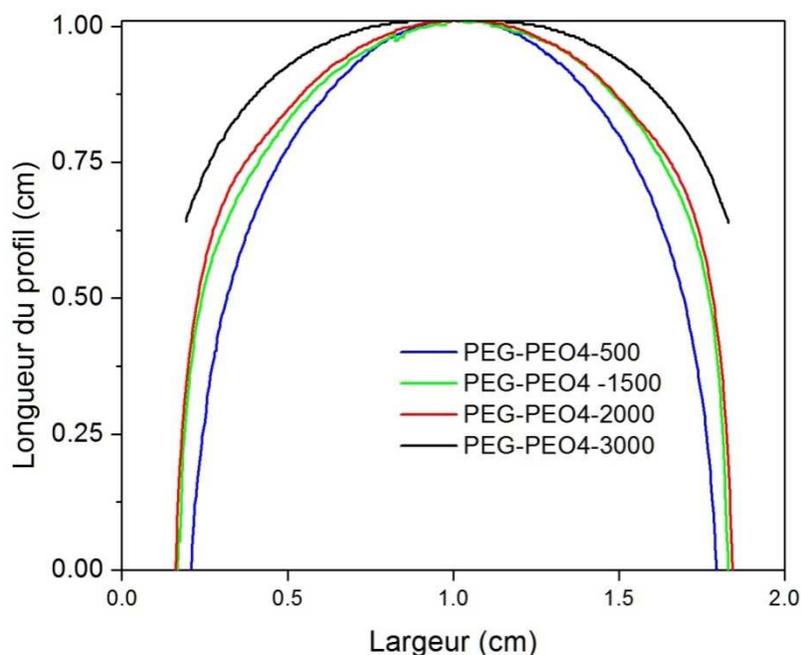


Figure 96 : Profils de l'interface des formulations PEG-PEO4 entre 500 ppm et 3000 ppm à $v_{fi}=5$ cm/s. Longueur du profil en fonction de la largeur de la géométrie

En fait il n'est pas aussi simple d'observer les évolutions des profils avec l'importance des effets viscoélastiques. En effet, si on regarde maintenant les évolutions avec les vitesses des deux formulations les moins concentrées (500 ppm et 1000 ppm) on se rend compte, comme on s'y attendait compte tenu des observations initiales, que la transition vers la stabilisation du profil intervient à des vitesses d'autant plus faibles que les effets viscoélastiques sont faibles. Cette tendance est telle que pour le PEG-PEO 500 nous

n'observons presque pas de décalage des profils newtonien/viscoélastique dans notre gamme de mesures de vitesses donnant des écoulements stables (voir Figure 97a) : on perçoit une petite différence à partir de 10cm/s. Pour le PEG PEO 1000 on commence à percevoir nettement un écart entre les profils à partir de 5cm/s (voir Figure 97b). Dans ces conditions nous ne pouvons pas être tout à fait certains que les profils utilisés pour la comparaison de la Figure 96 correspondent effectivement aux profils stables, en particulier aux plus faibles concentrations.

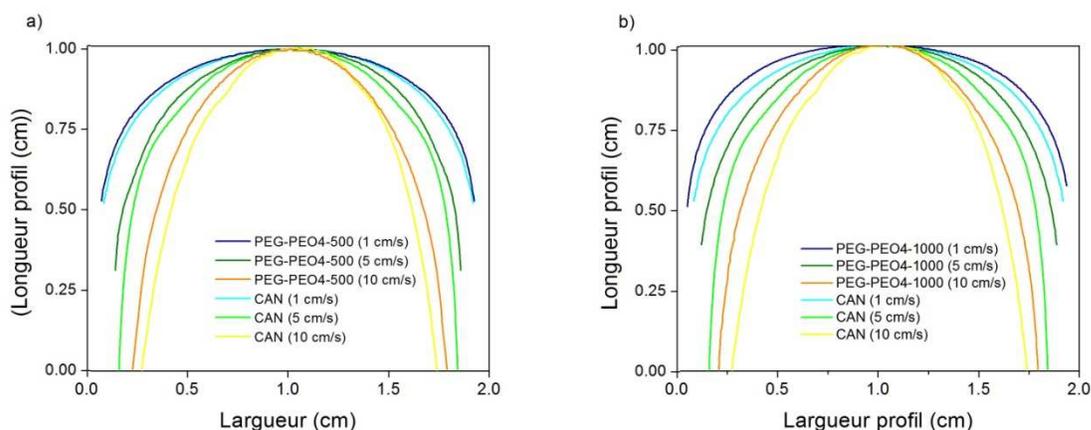


Figure 97 : Comparaison des profils de l'interface entre Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) et deux formulations PEG-PEO4/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s). **a)** PEG-PEO4-500 ($\eta=0,22$ Pa.s) est comparé au Canadou entre $v_{fi}=1$ cm/s et $v_{fi}=10$ cm/s **b)** PEG-PEO4-1000 ($\eta=0,24$ Pa.s) est comparé au Canadou entre $v_{fi}=1$ cm/s et $v_{fi}=10$ cm/s.

4.1.5 Impact de la tension de surface

Pour observer un possible effet de la tension interfaciale, une expérience a été réalisée avec une formulation où la tension interfaciale est 10 fois plus faible que la tension interfaciale des systèmes originaux.

Nous observons globalement les mêmes évolutions du profil avec la vitesse qu'avec une haute tension interfaciale pour les deux types de fluides (voir Figure 98 et Figure 99). A noter que la forme de l'interface du fluide viscoélastique est constante à partir de $v_{fi}=5$ cm/s (Figure 99) et il n'est pas possible réaliser des expériences de déplacement avec le fluide newtonien à $v_{fi}>8$ cm/s car le profil devient instable.

Lorsqu'on compare maintenant plus précisément la forme de chacun de ces profils pour les deux valeurs de tensions de surface et à chaque vitesse, on n'observe pas de différences sensibles dans les évolutions pour le fluide newtonien avec différentes tensions interfaciales (voir Figure 100) aux différentes vitesses. On note cependant une légère différence aux faibles vitesses, qui peut être liée au fait que la forme du profil dans ces régimes est plus influencée par des effets de tension interfaciale que par des effets visqueux (voir discussion).

En revanche pour le fluide viscoélastique utilisé ici (PAM 6000) on constate un léger écart qui semble augmenter quelque peu avec la vitesse. Il est cependant difficile de conclure qu'il y a dans ce cas un effet sensible. En fait il paraît même peu probable que cet effet existe spécifiquement avec un fluide viscoélastique alors qu'il n'existe pas avec un fluide newtonien. Compte tenu des évolutions plus grandes de la forme des profils dans le cas newtonien l'explication la plus probable est que l'amplitude d'un effet de tension de surface soit suffisamment faible pour être masqué avec le fluide newtonien et en revanche visible sur les profils des fluides viscoélastiques qui n'évoluent pas avec la vitesse.

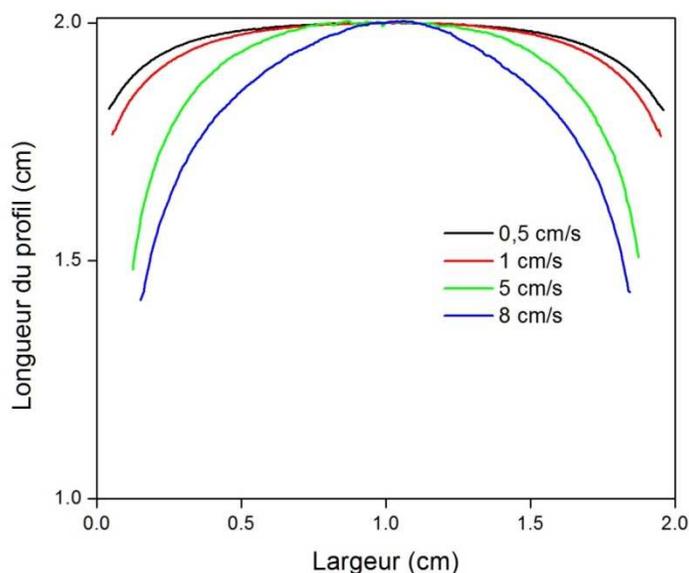


Figure 98 : Expériences de déplacement a faible tension interfaciale ($\sigma=3,1$ mN/m). Profils de l'interface Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) entre 0,5 cm/s (noir) et 8 cm/s (bleu).

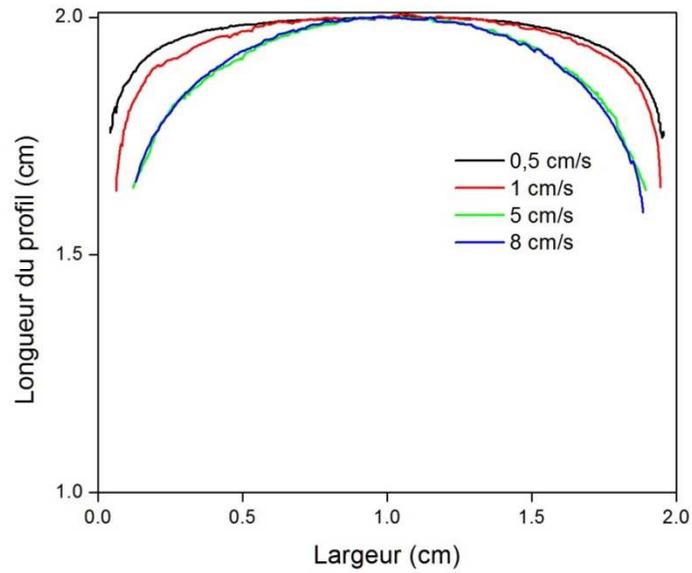


Figure 99 : Expériences de déplacement a faible tension interfaciale ($\sigma=2,8$ mN/m). Profils de l'interface PAM-6000/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) entre 0,5 cm/s (noir) et 8 cm/s (bleu).

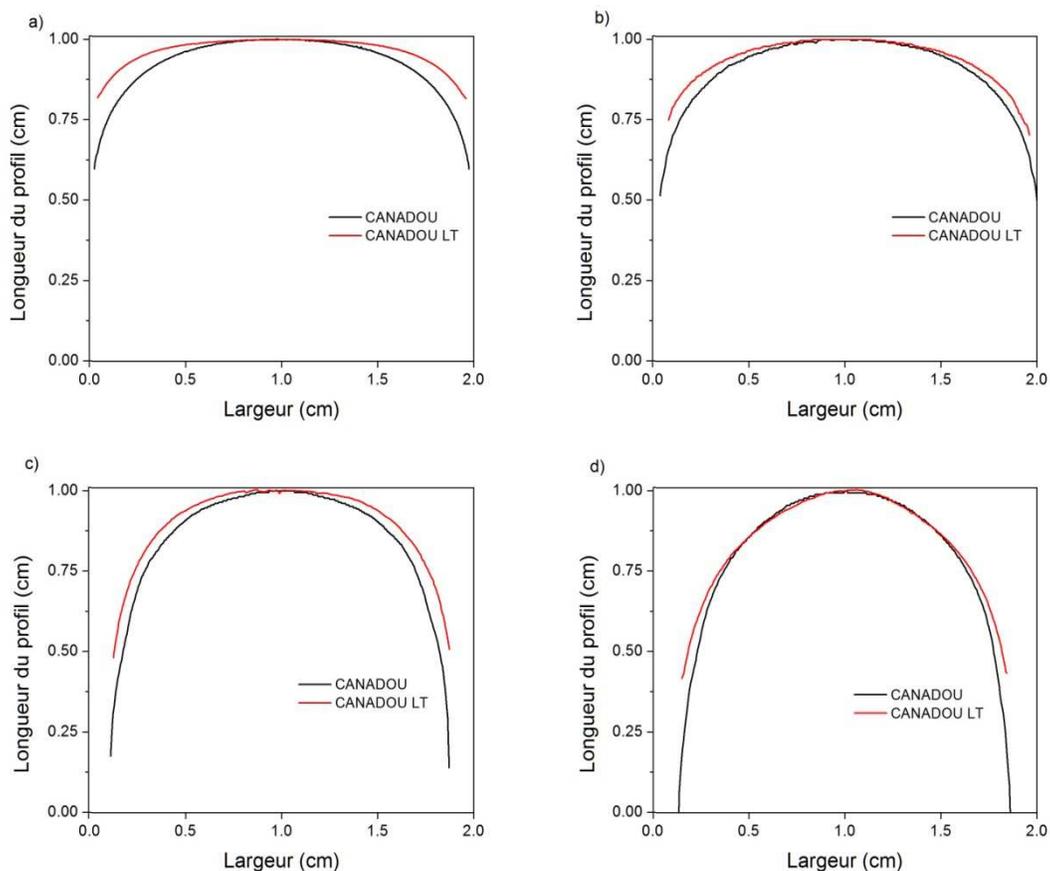


Figure 100 : Comparaison entre les profils de l'interface pour l'expérience de déplacement Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s)/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) entre les systèmes originaux ($\sigma=34,5$ mN/m) et les systèmes a faible tension (CANADOU LT : $\sigma=3,1$ mN/m). **a)** A $v_{fi}=0,5$ cm/s, **b)** A $v_{fi}=1$ cm/s, **c)** A $v_{fi}=5$ cm/s, **d)** A $v_{fi}=8$ cm/s.

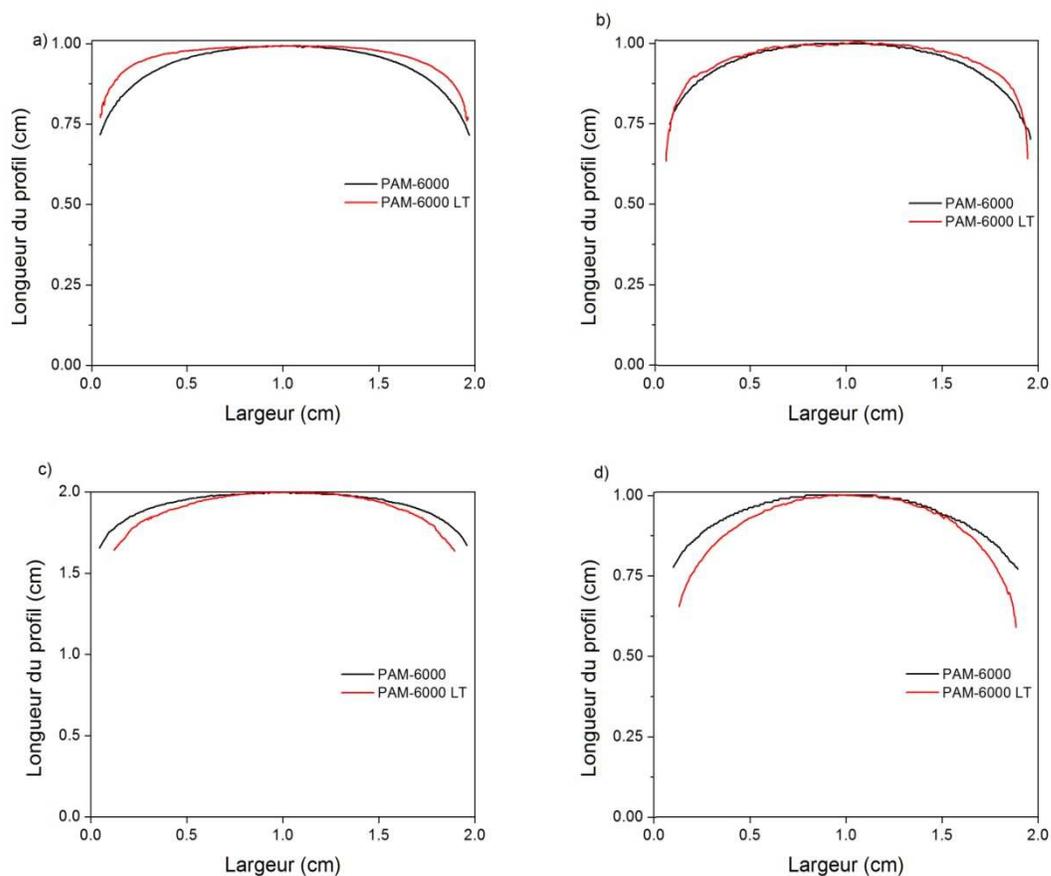


Figure 101 : Comparaison entre les profils de l'interface pour l'expérience de déplacement PAM-6000/huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s) entre les systèmes originaux ($\sigma=26,1$ mN/m) et les systèmes a faible tension (PAM-6000 LT : $\sigma=2,8$ mN/m). **a)** A $v_{fi}=0,5$ cm/s, $\eta_{PAM-6000}=0,32$ Pa.s, **b)** A $v_{fi}=1$ cm/s, $\eta_{PAM-6000}=0,26$ Pa.s **c)** A $v_{fi}=5$ cm/s $\eta_{PAM-6000}=0,16$ Pa.s, **d)** A $v_{fi}=8$ cm/s, $\eta_{PAM-6000}=0,14$ Pa.s.

4.2 Écoulement dans d'autres géométries

4.2.1 Écoulement a travers une restriction

Nous avons réalisé une série d'expériences d'écoulements en restriction avec la même approche que pour les écoulements en conduite droite décrits ci-dessus : installation de l'huile dans la cellule, puis injection progressive du fluide déplaçant au-delà de la longueur d'établissement, puis repos et démarrage du test, et enfin suivi de l'interface par le dessus de la cellule. Les restrictions sont placées loin de l'entrée pour assurer que l'on atteint le régime stationnaire.

Écoulement à travers une restriction carrée (RC2)

Considérons pour commencer le cas d'un fluide déplaçant newtonien. Des séries d'images présentées en Figure 102 et Figure 103 montrent les évolutions typiques du profil de l'interface au cours du temps. Le profil initial (voir Figure 102a) correspond à celui atteint en régime stationnaire dans la cellule droite. A l'approche de la restriction ce profil commence à se déformer, en s'étirant avant l'entrée dans le petit canal (voir Figure 102b,c) cet étirement est d'autant plus marqué que la vitesse est élevée (comparer Figure 102b,c et Figure 103b,c) au point qu'à 10cm/s un mince filet de Canadou commence à pénétrer le petit canal. Cet effet semble à la fois d'autant plus important que le profil initial (stationnaire) était allongé, et être amplifié par une vitesse élevée. En ce sens il est dans la continuité de l'effet d'allongement du profil observé pour le Canadou dans la cellule droite lorsque la vitesse augmente. Ensuite le filet parvient à la sortie du petit canal et s'élargit ensuite plus ou moins rapidement, formant d'abord une sorte de champignon. Cet élargissement est encore une fois d'autant plus rapide que la vitesse est faible : le champignon est d'autant plus étiré que la vitesse est élevée (cf. Figure 102d et Figure 103d). Lorsque le filet a atteint le haut de l'image l'écoulement se poursuit et le filet s'élargit progressivement pour atteindre finalement une forme stationnaire (voir Figure 102i-l et Figure 103k,l).

Il est intéressant de noter que la forme stationnaire ne dépend pas de la vitesse et est symétrique par rapport à un plan médian. On s'attendait à ce résultat qui est conforme aux caractéristiques d'un écoulement de Stokes (écoulement stationnaire d'un fluide newtonien en l'absence d'effets d'inertie et d'effets d'interface) : dans ce cas l'augmentation de vitesse ne fait qu'induire une augmentation globale des contraintes dans le système par un facteur

constant, si bien que pour un fluide newtonien le champ de vitesse obtenu est simplement multiplié par le même facteur. On constate au passage que le déplacement de l'huile par un fluide newtonien n'est pas optimal, il reste semble t-il des zones d'huile sur les cotés de l'entrée et de la sortie du petit canal qui ne seront jamais déplacées.

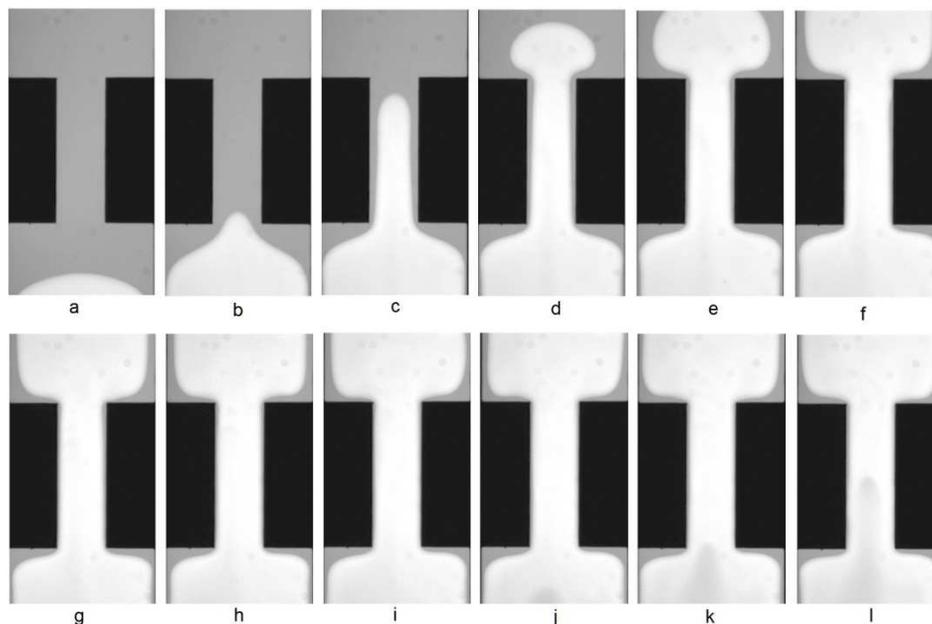


Figure 102 : Expérience de déplacement dans la restriction RC2 au cours du temps, $v_{fi}=1$ cm/s. Le fluide déplaçant est du Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

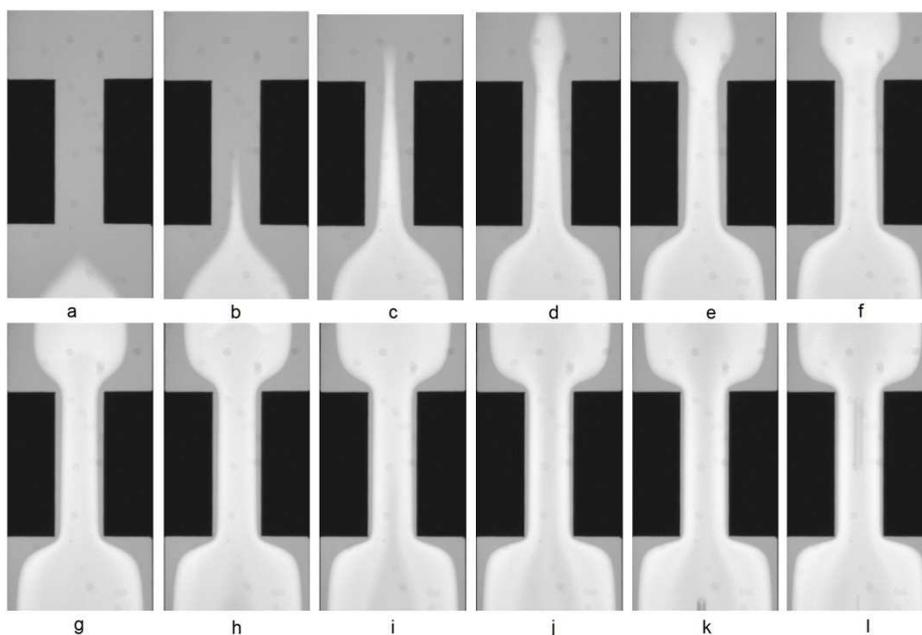


Figure 103 : Expérience de déplacement dans la restriction RC2 au cours du temps, $v_{fi}=10$ cm/s. Le fluide déplaçant est du Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

Les écoulements de fluides déplaçants viscoélastiques se déroulent globalement de la même façon : étirement de l'interface, pénétration dans le petit canal, élargissement à la sortie, puis établissement progressif du régime stationnaire (voir Figure 104 à 1cm/s et Figure 105, Figure 106 à 10cm/s).

On peut cependant remarquer un certain nombre de points :

- 1) A faible vitesse (1cm/s) (cf. Figure 104) les déformations de l'interface d'un fluide viscoélastique sont analogues à celles observées pour le fluide newtonien.
- 2) A forte vitesse (10 cm/s) le filet qui se forme et qui pénètre finalement dans le canal est beaucoup moins « pointu » que celui du fluide newtonien (cf. Figure 105b,c et Figure 106b,c). Cependant compte tenu du fait que le profil arrivant (depuis l'amont) est lui-même moins pointu que celui du fluide newtonien, cet effet n'est pas réellement discriminant.
- 3) Lors de la propagation dans le canal à forte vitesse, le filet du fluide viscoélastique est approximativement rectangulaire alors que celui du

fluide newtonien est triangulaire (cf Figure 103c, Figure 105c et Figure 106c).

- 4) Lors de la sortie du petit canal le fluide viscoélastique s'élargit plus rapidement que le fluide newtonien dont le front reste assez effilé au départ.
- 5) La forme de l'interface stationnaire pour le fluide viscoélastique n'est pas symétrique et varie avec la vitesse. Plus la vitesse est grande (voir comparaisons à différentes vitesses 1, 5 et 10 pour les profils stationnaires, Figure 107 et Figure 108) plus le profil d'entrée est resserré, ce qui est en concordance des effets en écoulement monophasique (écoulements secondaires) [88;89] et plus le profil de sortie s'élargit au point de se coller contre les parois à l'extrémité du canal.

Les trois derniers points sont des caractéristiques discriminantes de l'écoulement d'un fluide déplaçant viscoélastique. On retrouve finalement à chaque fois l'effet général observé précédemment de tendance à élargir le front de propagation à travers le fluide newtonien. Cet effet est d'autant plus important que la vitesse est grande, autrement dit que les contraintes normales sont élevées. A noter qu'il existe un effet apparemment inverse à l'entrée du petit canal.

Finalement on a pu vérifier ces conclusions à partir d'expériences réalisées avec le PEG-PEO à différentes concentrations (cf Figure 108). On constate alors que la tendance à l'élargissement à la sortie du petit canal est d'autant plus marquée que la vitesse est élevée et que les contraintes normales sont importantes.

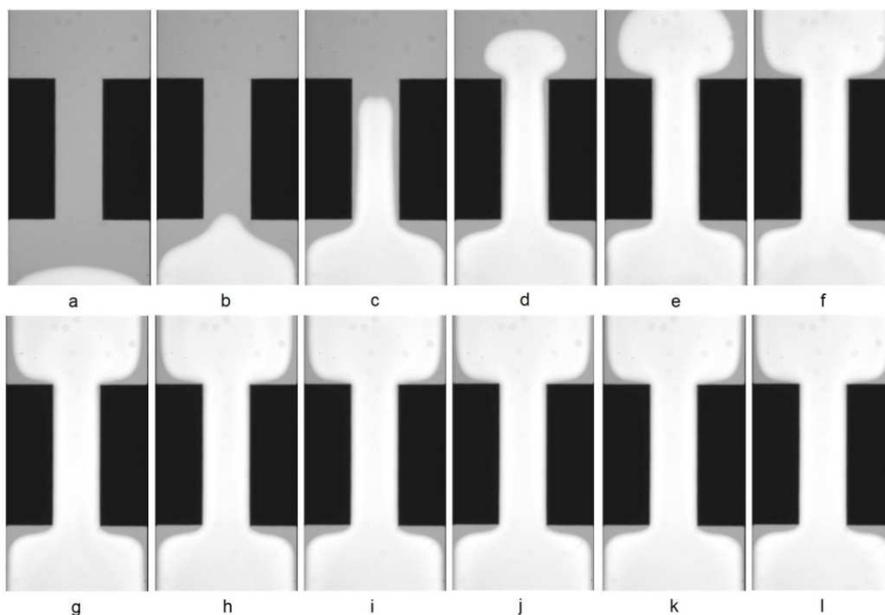


Figure 104 : Expérience de déplacement dans la restriction RC2 au cours du temps, $v_{fi}=1$ cm/s. Le fluide déplaçant est du PAM6000 ($\eta=0,19$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

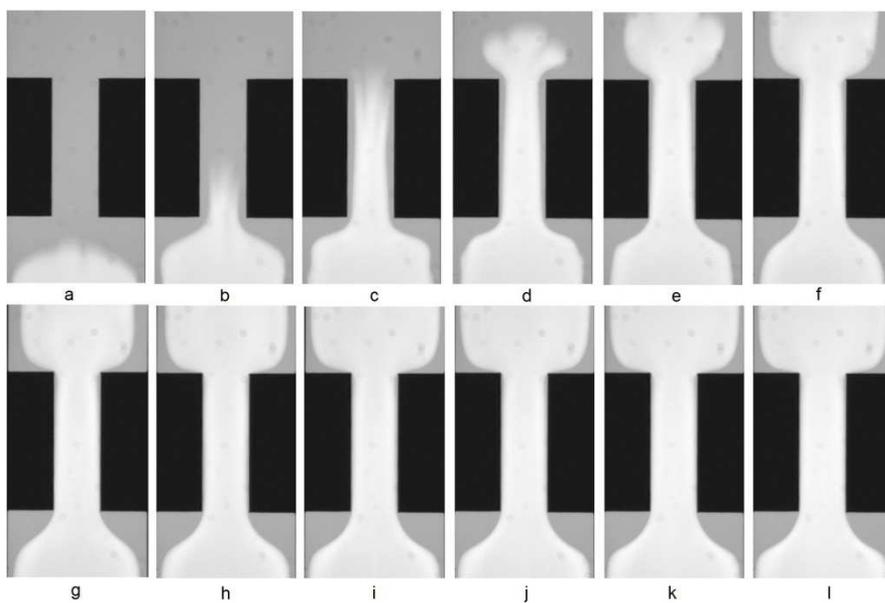


Figure 105: Expérience de déplacement dans la restriction RC2 au cours du temps, $v_{fi}=10$ cm/s. Le fluide déplaçant est du PAM6000 ($\eta=0,14$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

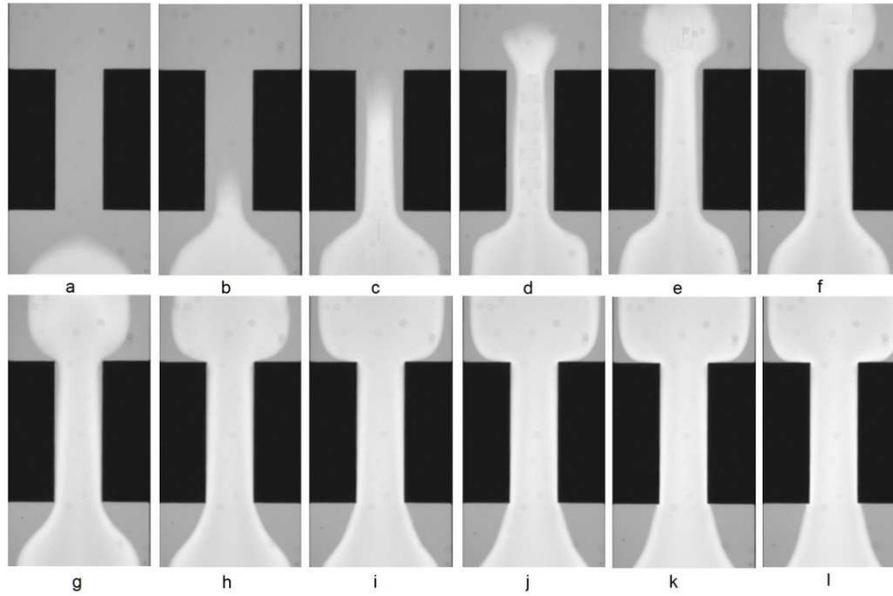


Figure 106 : Expérience de déplacement dans la restriction RC2 au cours du temps, $v_{fi}=10$ cm/s. Le fluide déplaçant est du PEG-PEO4-2000 ($\eta=0,26$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

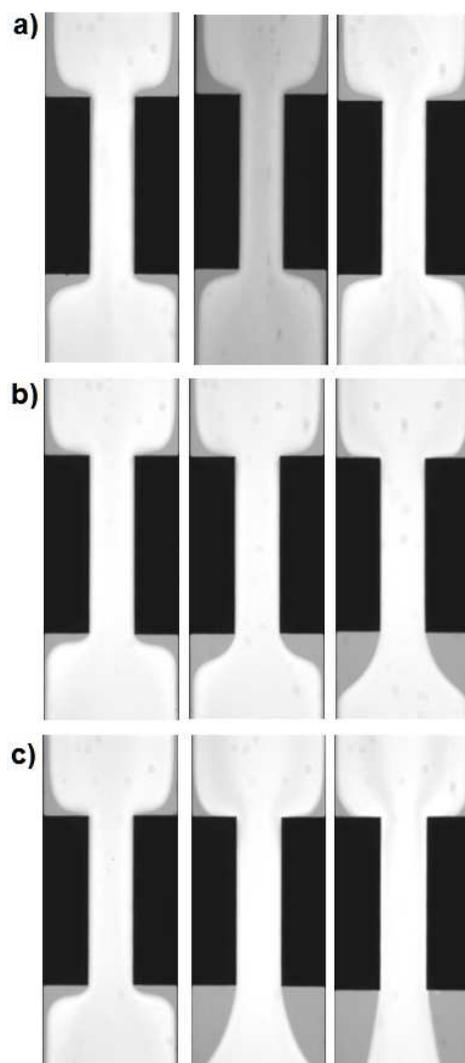


Figure 107 : Expériences de déplacement dans une restriction abrupte entre 1 cm/s (gauche) 5 cm/s au centre et 10 cm/s (droite). Le fluide déplaçant est : **a)** Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s), **b)** PAM-6000 (η variable), **c)** PEG-PEO4-2000 ($\eta=0,26$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s). L'écoulement se fait du bas vers le haut.

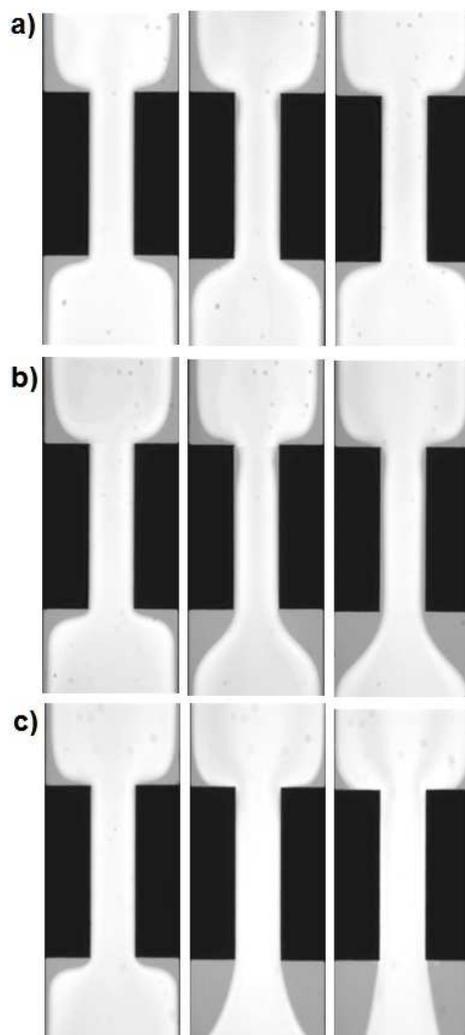


Figure 108 : Expériences de déplacement dans une restriction abrupte entre 1 cm/s (gauche) 5 cm/s (au centre) et 10 cm/s (droite) entre 1 cm/s (gauche) et 10 cm/s (droite). Le fluide déplaçant est : **a)** PEG-PEO4-500 ($\eta=0,22$ Pa.s), **b)** PEG-PEO4-1000 ($\eta=0,24$ Pa.s), **c)** PEG-PEO4-2000 ($\eta=0,26$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

Écoulement en restriction hyperbolique

Les évolutions des profils d'interface dans le cas des écoulements à travers les restrictions hyperboliques présentent des analogies qualitatives avec ceux observés dans la restriction carrée : on a d'abord un resserrement puis un élargissement et finalement un profil qui envahit pratiquement toute la largeur du canal (cf Figure 109a). Cependant ils ont une caractéristique surprenante : on n'observe pas d'effet du comportement rhéologique, à vitesse

égale les profils aux différentes étapes (entrée, pénétration, élargissement, établissement) du fluide newtonien et du fluide viscoélastique sont identiques (cf Figure 109 et Figure 110 par rapport aux Figure 109 et Figure 110). Il reste que les profils sont quelque peu différents pour différentes vitesses. Cet effet peut être attribué au phénomène décrit dans la section 3.1.2c où l'on considère que dans une géométrie hyperbolique comme celle utilisée pour mesurer la viscosité élongationnelle l'effet de la première différence de contraintes normales s'annule du fait de la symétrie [83]

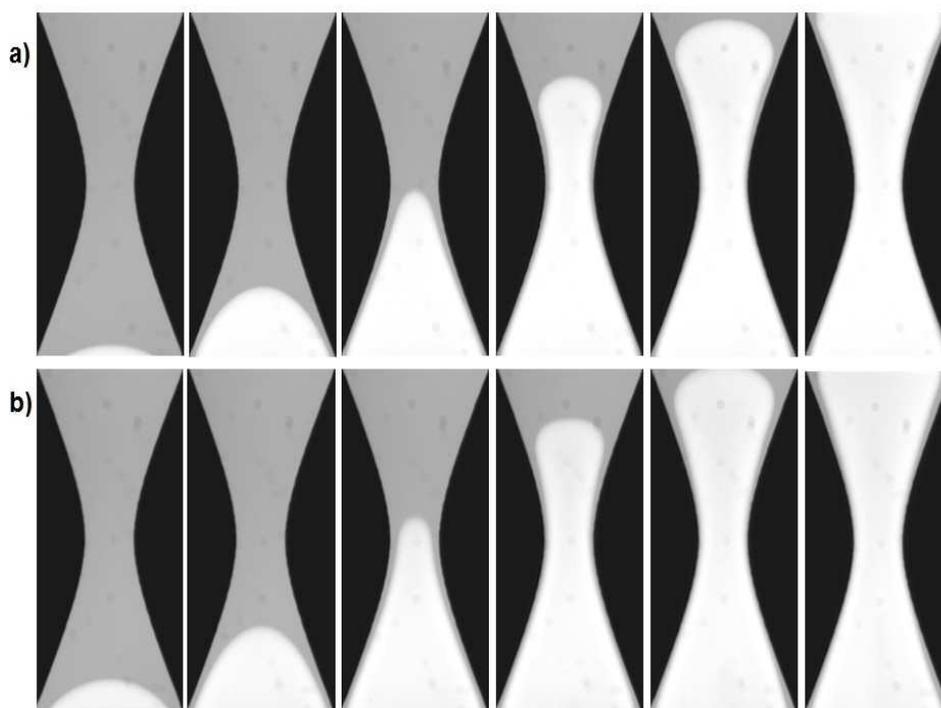


Figure 109 : Expériences de déplacement dans une restriction hyperbolique à 1 cm/s. Le fluide déplaçant est : **a)** Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s), **b)** PAM-6000 ($\eta=0,19$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

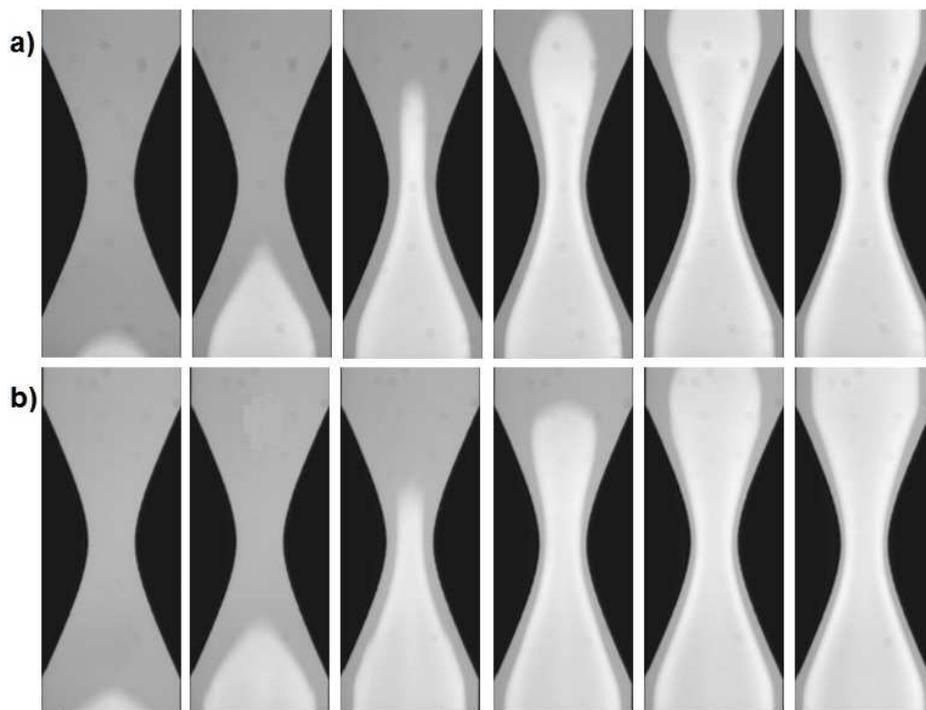


Figure 110 : Expériences de déplacement dans une restriction hyperbolique à 10 cm/s. Le fluide déplaçant est : **a)** Canadou ($\eta=0,16$ Pa.s), **b)** PAM-6000 ($\eta=0,19$ Pa.s). Le fluide déplacé est de l'huile de silicone ($\eta=0,1$ Pa.s)

4.2.2 Expériences en canal microscopique (Microfluidique)

4.2.2.a Déplacement a débit constant

Une première expérience avec du Canadou et du PAM-6000 a été réalisée à des débits compris entre 0,36 ml/h et 1,44 ml/h. Dans cette géométrie, ces débits correspondent à des gradients de vitesse moyens de 50 s^{-1} et 200 s^{-1} respectivement, les mêmes qu'obtenus pour certaines expériences dans la cellule de Hele-Shaw. Les effets viscoélastiques notables sont attendus en terme de contraintes normales significatives à partir de 50 s^{-1} avec l'apparition des contraintes normales de magnitude 30 Pa. La pénétration instantanée des fluides dans le pore le plus large de la géométrie est montrée dans la Figure 111.

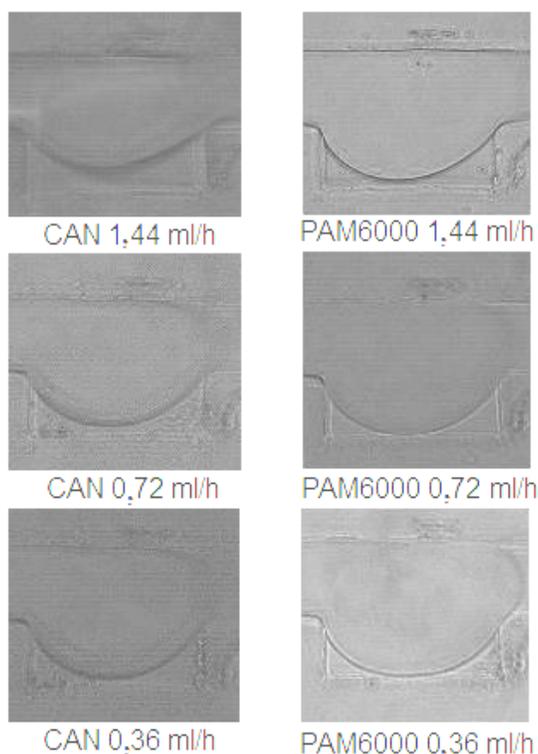


Figure 111 : Pénétration des fluides dans le premier pore de la géométrie débit imposé. Les photos sont prises 60 ms après l'entrée du front dans le pore. L'écoulement se fait de la gauche vers la droite.

Nous observons avec ces expériences à débit constant qu'une invasion d'une fraction importante du pore par le fluide déplaçant se fait en grande partie dès l'entrée de celui-ci (Figure 112). Comme on le voit dans cette figure, le fluide remplit instantanément le pore (t_1), puis il libère progressivement une partie du pore (le front remonte jusqu'à une hauteur h maximale dans un temps t_2) et enfin pénètre à nouveau pour remplir complètement le pore (t_3).

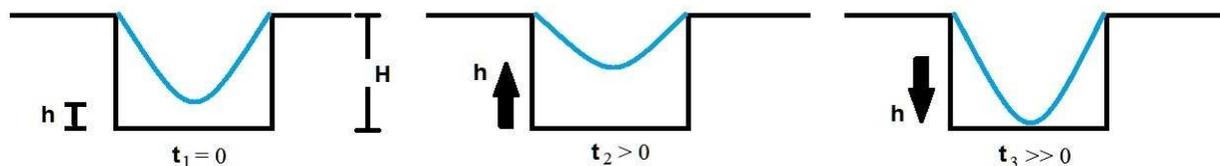


Figure 112 : Évolution dans le temps de la position de l'interface fluide déplaçant/Huile dans le pore lors de l'injection de la phase aqueuse dans la géométrie.

Ce comportement s'avère parfaitement reproductible. Nous n'avons pas pour le moment d'interprétation associée, mais les hypothèses qui peuvent être envisagées sont :

- l'apparition d'une dépression dans le fluide déplaçant dû à son entrée, en aval de l'écoulement et du pore considéré, dans une partie du microsysteme avec un confinement plus faible (plot de connexion des tubes par exemple), créant une succion capillaire, comme présenté dans l'article [90]
- une conséquence de l'accumulation de l'huile récupérée (drainée) en amont du pore lors de l'écoulement de la phase aqueuse.
- une conséquence des propriétés mécaniques du matériau constitutif du microsysteme, le PDMS présentant une certaine élasticité.

A partir de l'analyse des images du déplacement du front, nous avons représenté l'évolution temporelle de la position de l'apex du front h rapporté à la profondeur du pore H (Figure 113). Le temps $t_1 = 0$ correspond au moment où le fluide déplaçant a traversé le pore principal.

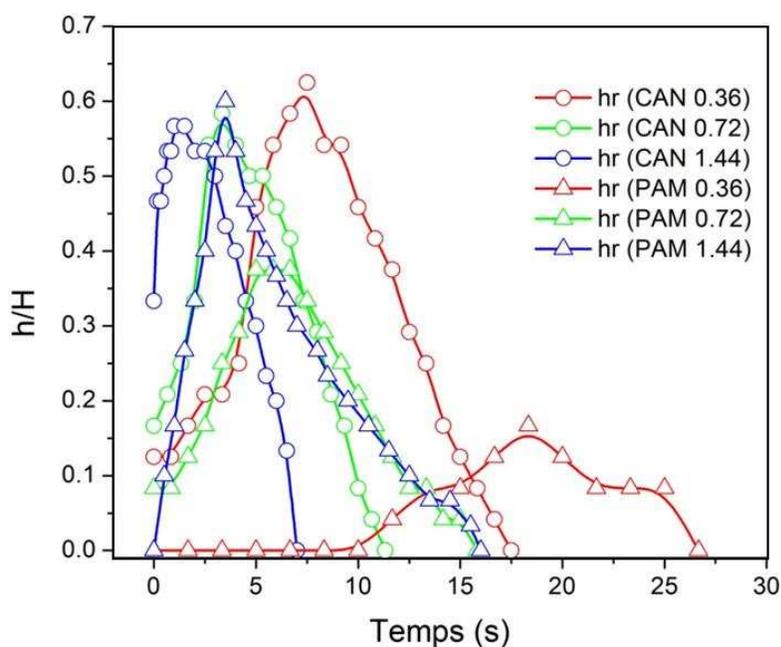


Figure 113 : Position relative du front de l'interface eau/huile dans le pore au cours du temps pour différentes formulations à plusieurs débits imposés. En rouge, pour 0,36 ml/h : Canadou (O), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(Δ), $\eta=0,18$ Pa.s. En vert, pour 0,72 ml/h : Canadou (O), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(Δ), $\eta=0,16$ Pa.s. En bleu, pour 1,44 ml/h : Canadou (O), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(Δ), $\eta=0,14$ Pa.s

Nous observons dans la Figure 113 que pour les expériences avec le Canadou, la position h/H maximale est indépendante de la vitesse d'injection. On remarque que le phénomène évolue avec un temps caractéristique d'autant plus court que le débit est élevé. Pour le fluide viscoélastique, le PAM-6000, la position h/H maximale augmente avec la vitesse d'injection, pour atteindre des valeurs similaires à celles du fluide newtonien à haute vitesse. De même qu'avec le fluide newtonien, mais moins distinctement, le remplissage du pore est d'autant plus long que le débit est faible. Remarquons encore le temps relativement important de remplissage initial du pore pour le PAM-6000 à faible débit.

Le remplissage des deux autres pores s'est avéré plus lent que celui du pore principal. Le comportement de remplissage de ces deux pores est également reproductible, mais contrairement au premier pore, on ne voit pas le front du fluide déplaçant remonter une fois que le remplissage commence.

4.2.2.b Déplacement a pression imposée

Pour essayer de préciser les conditions d'apparition du déplacement oscillatoire de l'interface fluide déplaçant/huile, nous avons poursuivi en réalisant des expériences à pression imposée. Pour ces expériences, entre 100 mbar et 300 mbar sont imposés en surpression de la pression atmosphérique en entrée pour le fluide déplaçant. Les résultats pour la position relative de l'interface sont présentés ci-dessous (Figure 114).

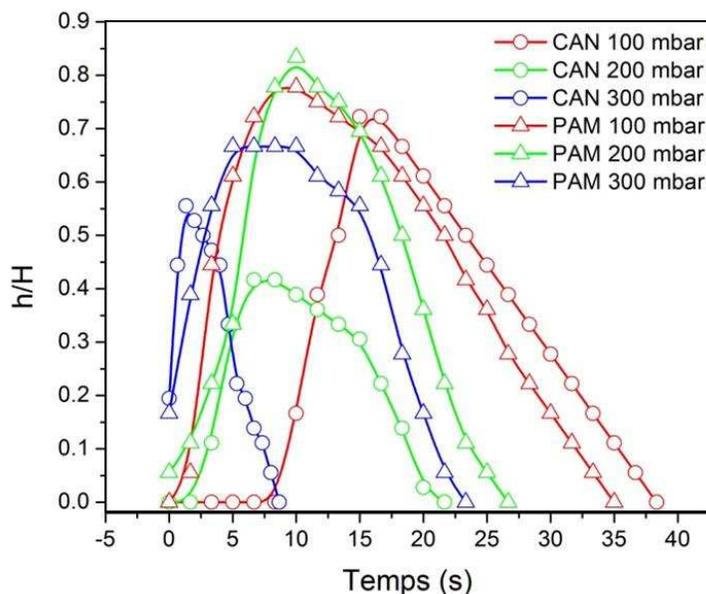


Figure 114 : Position relative du front de l'interface eau/huile dans le pore au cours du temps pour différentes formulations à différentes pressions imposées. En rouge, pour 100 mbar : Canadou (○), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(△), $\eta=0,15$ Pa.s. En vert, pour 200 mbar : Canadou (○), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(△), $\eta=0,13$ Pa.s. En bleu, pour 300 mbar : Canadou (○), $\eta = 0,16$ Pa.s et PAM-6000(△), $\eta=0,12$ Pa.s.

Les écoulements à pression imposée sont toujours marqués par une entrée de la phase aqueuse, son retrait et le remplissage final du pore. La position maximale de l'interface lors du déplacement transitoire est globalement plus grande que pour les manipulations précédentes. Hormis l'observation nette d'un phénomène se produisant sur un temps d'autant plus grand que le gradient de pression est faible –ce qui rejoint les observations à débit imposé–, aucune autre tendance particulière ne semble émerger de ces expérimentations à pression imposée.