

# Injection de mousse à grande échelle

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence l'impact de la prise en compte des lois d'échelle des paramètres du modèle de mousse avec la perméabilité (identifiées au chapitre 4) dans un réservoir hétérogène. Pour cela, nous considérons un modèle de simulation à grande échelle constitué de deux couches dont les perméabilités présentent un contraste important. L'écoulement de mousse est simulé ainsi de deux manières différentes avec et sans les lois d'échelle développées en chapitre 4 afin de saisir leurs incidences sur le comportement de la mousse.

## 5.1 Modèle de simulation : une coupe bi-couche

Le modèle de simulation considéré correspond à une coupe verticale de réservoir constitué de deux couches de lithologies différentes, comme illustré par la figure 5.1. Les deux couches sont horizontales et d'épaisseur constante et leurs propriétés, qui correspondent à un grès de Fontainebleau, sont supposées homothétiques. Le réservoir est maillé suivant les deux axes  $X$  et  $Z$ , de façon cartésienne, avec des pas de discrétisation constants  $\Delta X = 2$  m et  $\Delta Z = 1$  m. La hauteur  $h_i$  de chaque couche  $i = 1, 2$  est de 10 m (la hauteur totale du réservoir est 20 m) et leur extension horizontale (selon l'axe  $X$ ) est de 200 m. L'épaisseur  $e$  du modèle (suivant l'axe  $Y$ ) est fixée à 20 m.

Deux puits injecteur et producteur sont positionnés au centre des mailles en  $X = 0$  et  $X = 200$  m. Dans ces puits, nous imposons les conditions aux limites suivantes : un débit constant en entrée pour chaque phase (gaz et eau) et une pression  $P = 100$  bar constante en sortie. Une concentration constante en tensioactif de 5 g/L est associée à l'eau injectée. Le débit total  $Q$  est fixé à 26.4 m<sup>3</sup>/jour et la qualité de mousse imposée  $f_{g0}$  en entrée est de 0.6 ce qui est proche de la qualité optimale pour les deux milieux. La résolution du système d'équations correspondant au cas étudié a été réalisée à l'aide d'un schéma numérique implicite [72] du

simulateur de réservoir PumaFlow d'IFPEN.

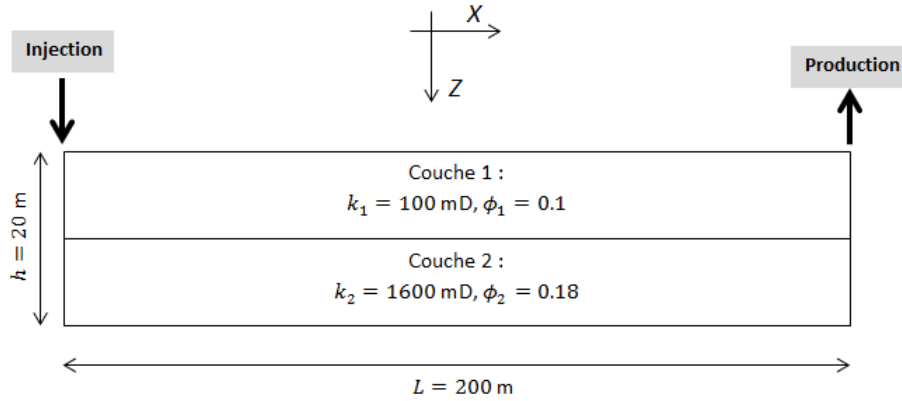


FIGURE 5.1 – Modèle de réservoir bi-couche utilisé pour la simulation de l'écoulement de mousse avec et sans lois d'échelle des paramètres du modèle empirique par rapport la perméabilité du milieu poreux.

Les propriétés pétrophysiques du milieu ainsi que la saturation et la pression initiales sont définies au centre de chaque maille. La grille est initialement saturée à 100 % en eau (sans tensioactifs) et une pression initiale de 100 bar a été appliquée au milieu de la formation. Les perméabilités relatives eau/gaz des deux couches sont exprimées par des lois puissances comme celle ajustées pour les deux carottes homothétiques considérées au chapitre 4. Par ailleurs, les pressions capillaires sont de nouveau déduites à partir de la fonction de Leverett  $J(S_w)$  ajustée pour ces deux carottes (voir section 4.5.1 chapitre 4). Les fonctions obtenues sont représentées sur la figure 5.2.

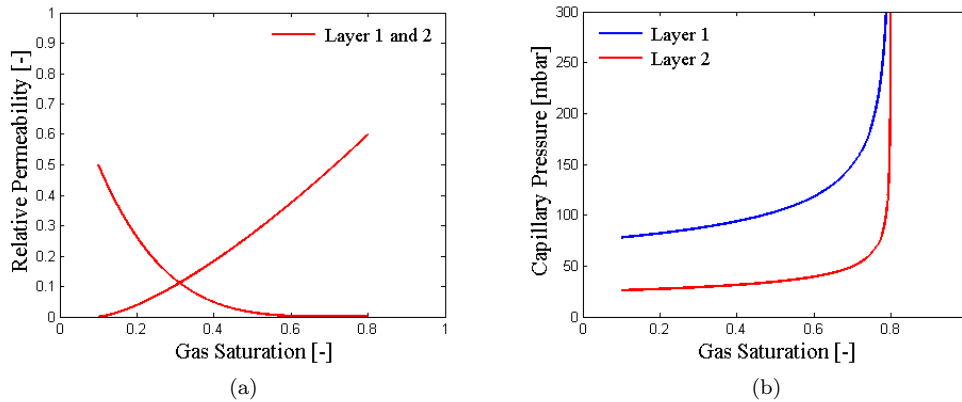


FIGURE 5.2 – Propriétés pétrophysiques du réservoir bi-couche obtenues par un ajustement des mesures sur carottes : (a) fonctions de perméabilité relative pour les deux couches et (b) pression capillaire pour chaque couche.

Dans cette étude, nous tenons compte de la compressibilité du gaz considéré à travers son facteur de compressibilité  $Z$  donné par la relation empirique  $Z = -3.6 \times 10^{-3}P + 1.03$  [113] à température constante, où  $P$  désigne la pression (en bar). L'adsorption du tensioactif sur la roche est toujours négligée. Les propriétés pétrophysiques des deux couches ainsi que celles des fluides utilisés dans la simulation sont récapitulés dans la table 5.1.

TABLE 5.1 – Modèle de simulation de l'écoulement de mousse à grande échelle.

	Couche 1	Couche 2
Extension horizontale, $L$ (m)	200	200
Largeur, $h$ (m)	10	10
Épaisseur, $e$ (m)	20	20
Porosité, $\phi$ (-)	0.1	0.18
Perméabilité, $k$ (mD)	100	1600
Saturation en eau résiduelle, $S_{wr}$ (-)		0.2
Saturation en gaz irréductible, $S_{gi}$ (-)		0.1
Perméabilité relative à l'eau maximale, $k_{rw}^{\max}$ (-)		0.5
Perméabilité relative au gaz maximale, $k_{rg}^{\max}$ (-)		0.6
Exposant, $n_w$ (-)		4.2
Exposant, $n_g$ (-)		1.4
Pression capillaire d'entrée, $P_e$ (mbar)	78	26
Exposant, $\lambda$ (-)	3	3
Viscosité de l'eau, $\mu_w$ (cP)		0.58
Viscosité du gaz, $\mu_g$ (cP)		0.019
Masse volumique de l'eau, $\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )		980
Masse volumique du gaz, $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )		149
Pression, $P$ (bar)		100
Température, $T$ (°C)		60
Débit total, $Q$ (m <sup>3</sup> /jour)		26.4
Qualité de mousse imposée, $f_{g0}$ (-)		0.6
Concentration en tensioactif, $C_s$ (g/L)		5
Pas de discrétisation, $\Delta X$ (m)		2
Pas de discrétisation, $\Delta Y$ (m)		20
Pas de discrétisation, $\Delta Z$ (m)		1

## 5.2 Effet des lois d'échelle selon l'hypothèse dynamique

Rappelons tout d'abord que l'hypothèse dynamique de la stabilité des lamelles indique que le paramètre  $M_{\text{ref}}$  du modèle de mousse varie en fonction de la perméabilité  $k$  du milieu poreux comme  $M_{\text{ref}} \sim \sqrt{k}$ , tandis que les autres paramètres  $S_w^*$  et  $\Theta$  demeurent constants (voir Table 4.6). Dans cette section, nous appliquons cette hypothèse pour la mise à l'échelle du

modèle de mousse pour la coupe bi-couche et nous mettons l'accent sur son incidence sur le comportement de la mousse par rapport au cas où le modèle de mousse est supposé identique pour les deux couches. Nous supposons que la perméabilité de référence est celle de la première couche. La table 5.2 montre les performances de la mousse ainsi considérées suivant les deux cas simulés. Les débits au puits de production, les pressions à l'injection, ainsi que les cartes de saturation et de texture obtenues à différentes dates dans chaque cas traité sont comparés en Figures 5.3, 5.4 et 5.5.

TABLE 5.2 – Modèles de mousse utilisés pour la mise en évidence de l'incidence des lois d'échelle selon l'hypothèse dynamique sur l'écoulement de mousse dans une section bi-couche.

	$M_{\text{ref}}$ (-)	$S_w^*$ (-)	$\Theta$ (-)	$N_{cg}^{\text{ref}}$ (-)	$e_c$ (-)
Simulation <b>avec</b> lois d'échelle					
Couche 1	273	0.38	34	$2.77 \times 10^{-8}$	0.7
Couche 2	1092				
Simulation <b>sans</b> lois d'échelle					
Couche 1 et 2	273	0.38	34	$2.77 \times 10^{-8}$	0.7

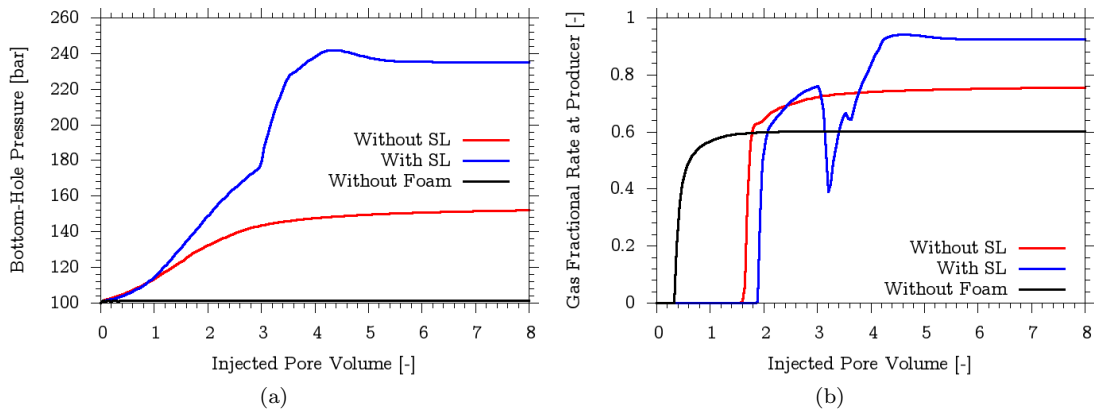


FIGURE 5.3 – Comparaison des données de puits : (a) la pression au fond du puits injecteur et (b) la fraction volumique de gaz dans l'effluent produit ; « SL » désigne les lois d'échelle.

Nous remarquons que la prise en compte des lois d'échelle conduit à la prévision d'une pression beaucoup plus élevée au puits injecteur, c'est-à-dire une performance de mousse accrue. Cela est attendu car une augmentation de la réduction de mobilité du gaz en présence de mousse a été appliquée dans la deuxième couche (de forte perméabilité) par comparaison au cas avec un  $M_{\text{ref}}$  uniforme. Par ailleurs, la percée du gaz dans le puits producteur est retardée et la production de gaz est accrue aux temps longs, ce qu'on peut également observer sur les champs de saturation et de texture reportés en Figure 5.4 et 5.5.

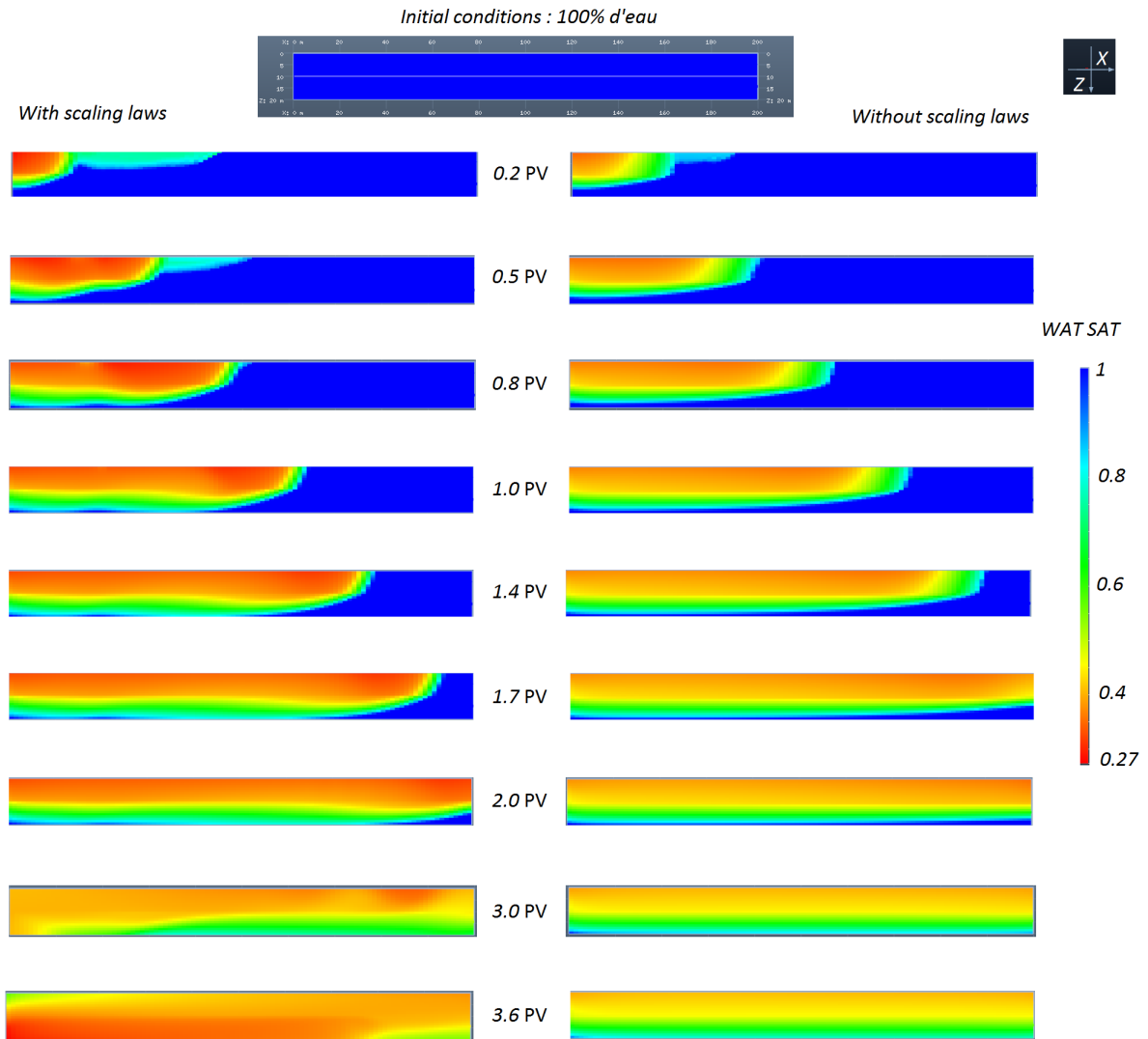


FIGURE 5.4 – Injection de gaz et d’une solution tensioactif (avec une qualité  $f_{g0} = 0.6$ ) dans une coupe de réservoir bi-couche initialement saturé en eau. À gauche, les cartes de saturation obtenues avec un modèle de mousse mis à l’échelle (selon l’hypothèse dynamique) par rapport à la perméabilité et à droite les résultats avec un modèle de mousse invariant avec la perméabilité.

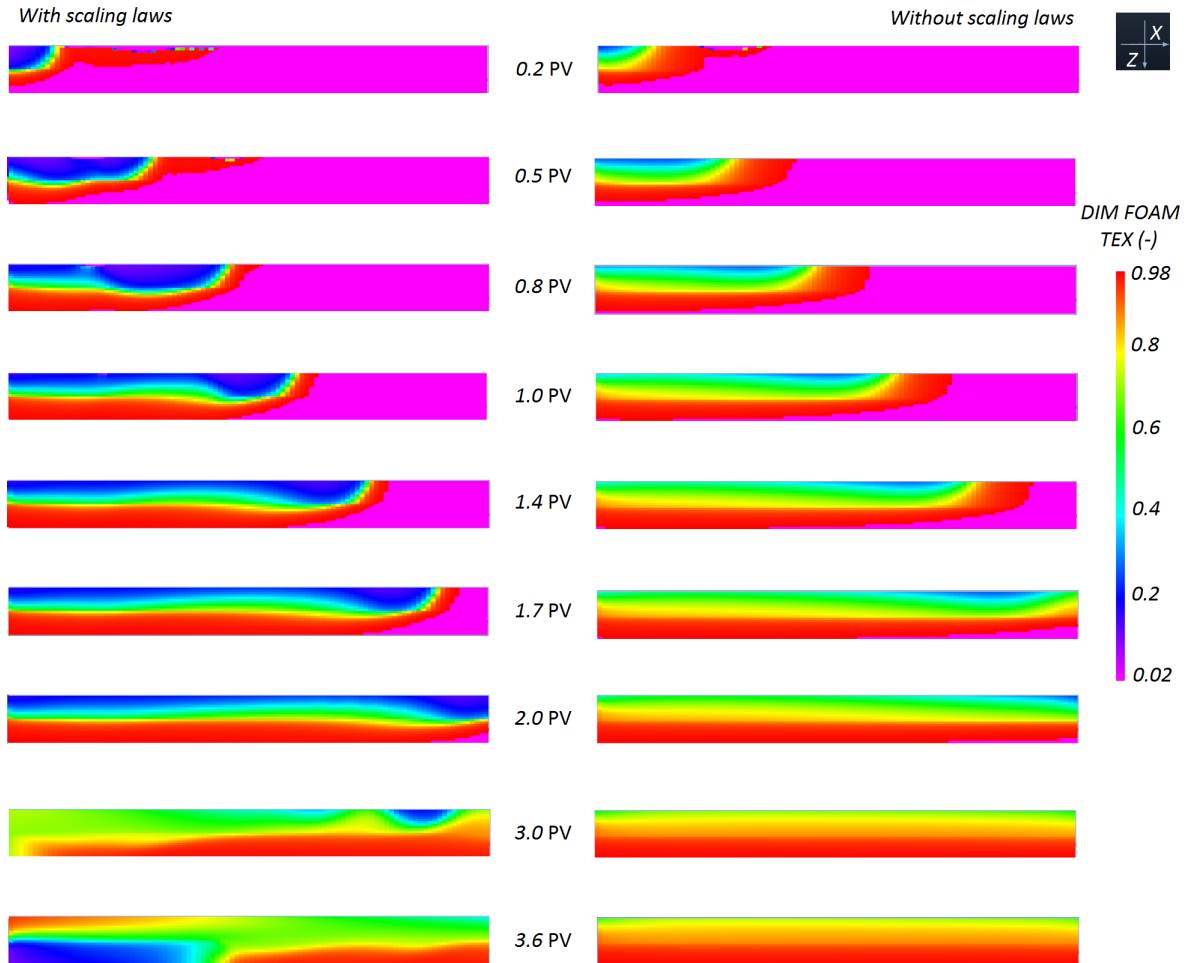


FIGURE 5.5 – Évolution de la texture adimensionnelle de la mousse ( $n_D = F_2$  sous l'hypothèse de l'équilibre local) à différents instants de l'injection : à gauche, les résultats avec les lois d'échelle et à droite sans lois d'échelle.

La figure 5.4 montre que les répartitions des fluides diffèrent considérablement entre les deux cas simulés pour des volumes injectés identiques. Le front de gaz s'avère plus stable et résistant à la ségrégation gravitaire en tenant compte des lois d'échelle. En effet, la forte réduction de mobilité dans la couche inférieure retient le gaz injecté plus longtemps avant qu'il se ségrège au toit de la section. Dans les deux cas, la mousse n'efface pas totalement les effets gravitaires bien que la couche supérieure de moindre perméabilité soit susceptible de les limiter. Notons qu'après un volume injecté très important (3.6 PV), la répartition du gaz demeure différente selon les deux modèles.

En ce qui concerne l'évolution de la texture adimensionnelle dans la grille, nous constatons que la mousse se forme brusquement au front du gaz, pour atteindre sa valeur maximale, dans les deux cas simulés. Nous remarquons qu'en tenant compte des lois d'échelles : (1) la mousse se casse plus rapidement à l'arrière du front, et en particulier, dans la couche supérieure, et (2) la mousse se crée et coalesce dans toute la grille, attestant ainsi d'un échange important entre les deux couches, tandis que dans le cas contraire la texture reste constante dans chaque couche.

### 5.3 Effet des lois d'échelle selon les lois observées

Rappelons que les lois identifiées à partir de la calibration du modèle de mousse sur des carottes de différentes perméabilités montrent que les deux paramètres  $S_w^*$  et  $M_{\text{ref}}$  varient avec la perméabilité  $k$  comme  $M_{\text{ref}} \sim \sqrt{k}$  et  $S_w^* \sim k^{-0.3}$ , et que le paramètre  $\Theta$  est quasi-constant. Dans cette section, nous appliquons ces lois pour la mise à l'échelle du modèle de mousse et nous comparons les résultats à ceux obtenus le modèle invariant. La table 5.3 reporte les modèles de mousse utilisés dans les deux cas et les figures 5.6, 5.7 et 5.8 comparent les deux cas.

TABLE 5.3 – Modèles de mousse utilisés pour la mise en évidence de l'incidence des lois d'échelle calibrées expérimentalement sur l'écoulement de mousse dans une section hétérogène.

	$M_{\text{ref}}$ (-)	$S_w^*$ (-)	$\Theta$ (-)	$N_{cg}^{\text{ref}}$ (-)	$e_c$ (-)
Simulation <b>avec</b> lois d'échelle					
Couche 1	273	0.38	34	$2.77 \times 10^{-8}$	0.7
Couche 2	1092	0.16			
Simulation <b>sans</b> lois d'échelle					
Couche 1 et 2	273	0.38	34	$2.77 \times 10^{-8}$	0.7

Nous constatons qu'en ajoutant la dépendance du paramètre  $S_w^*$  à la perméabilité, la pression au puits injecteur augmente plus vite encore (régime transitoire plus court) que selon les lois d'échelle précédentes (cf. section 5.2). Toutefois, les valeurs obtenues aux temps longs sont peu modifiées. La figure 5.7 montre que cette dépendance de  $S_w^*$  corrige davantage le front d'avancée du gaz (front quasi-homogène entre les deux couches), en contrôlant mieux la ségrégation gravitaire. En effet, un  $S_w^*$  plus faible dans la couche inférieure la plus perméable favorise la circulation

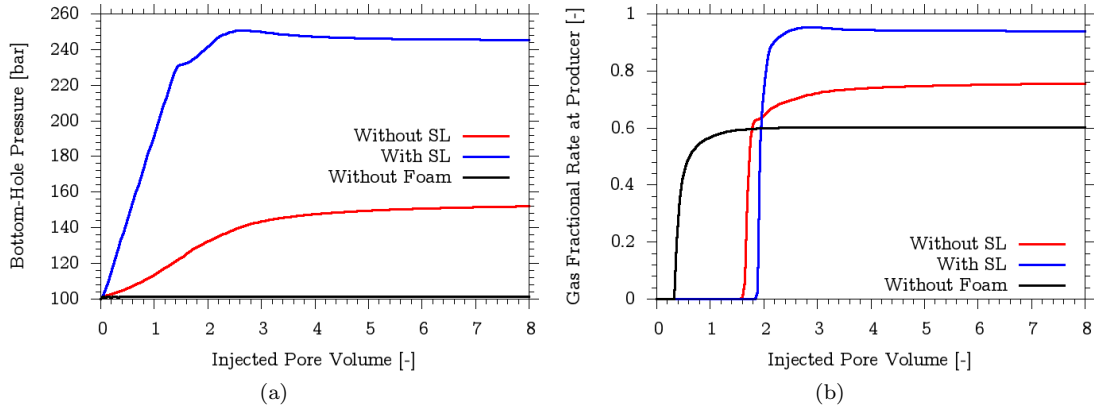


FIGURE 5.6 – Comparaison des résultats de puits : (a) la pression au fond du puits injecteur et (b) la fraction de gaz dans l’effluent produit (gas-cut) ; « SL » désigne les lois d’échelle.

du gaz dans cette couche, ce qui limite sa ségrégation. Cela est encore retrouvé sur la figure 5.8 qui montre une texture de mousse maximale dans la couche supérieure (mousse plus fine) et une texture de valeur plus faible dans la deuxième couche (mousse grossière). La texture demeure toujours à sa valeur maximale dans la couche de faible perméabilité, même après la percée du gaz, alors qu’elle se casse et se crée dans la couche de forte perméabilité. Par conséquent, un  $S_w^*$  dépendant de la perméabilité (selon les lois observées) donne un comportement de mousse très différent à celui obtenu avec un  $S_w^*$  invariant selon l’hypothèse dynamique.



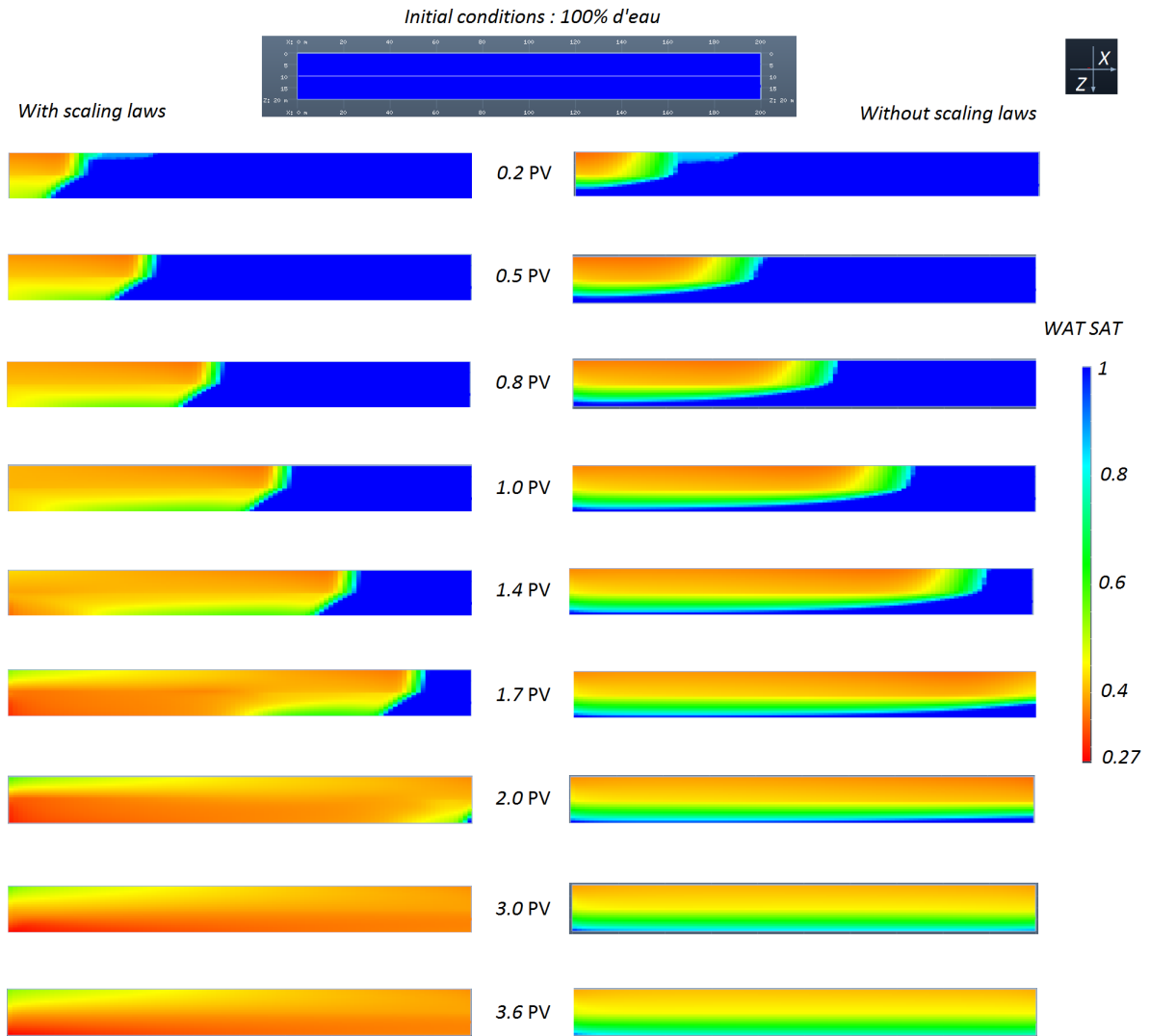


FIGURE 5.7 – Injection de gaz et d’une solution tensioactif (avec une qualité  $f_{g0} = 0.6$ ) dans une section bi-couche initialement saturée en eau. À gauche, les résultats obtenus avec un modèle de mousse mis à l’échelle (selon les lois observées) par rapport à la perméabilité et à droite les résultats avec un modèle de mousse invariant.

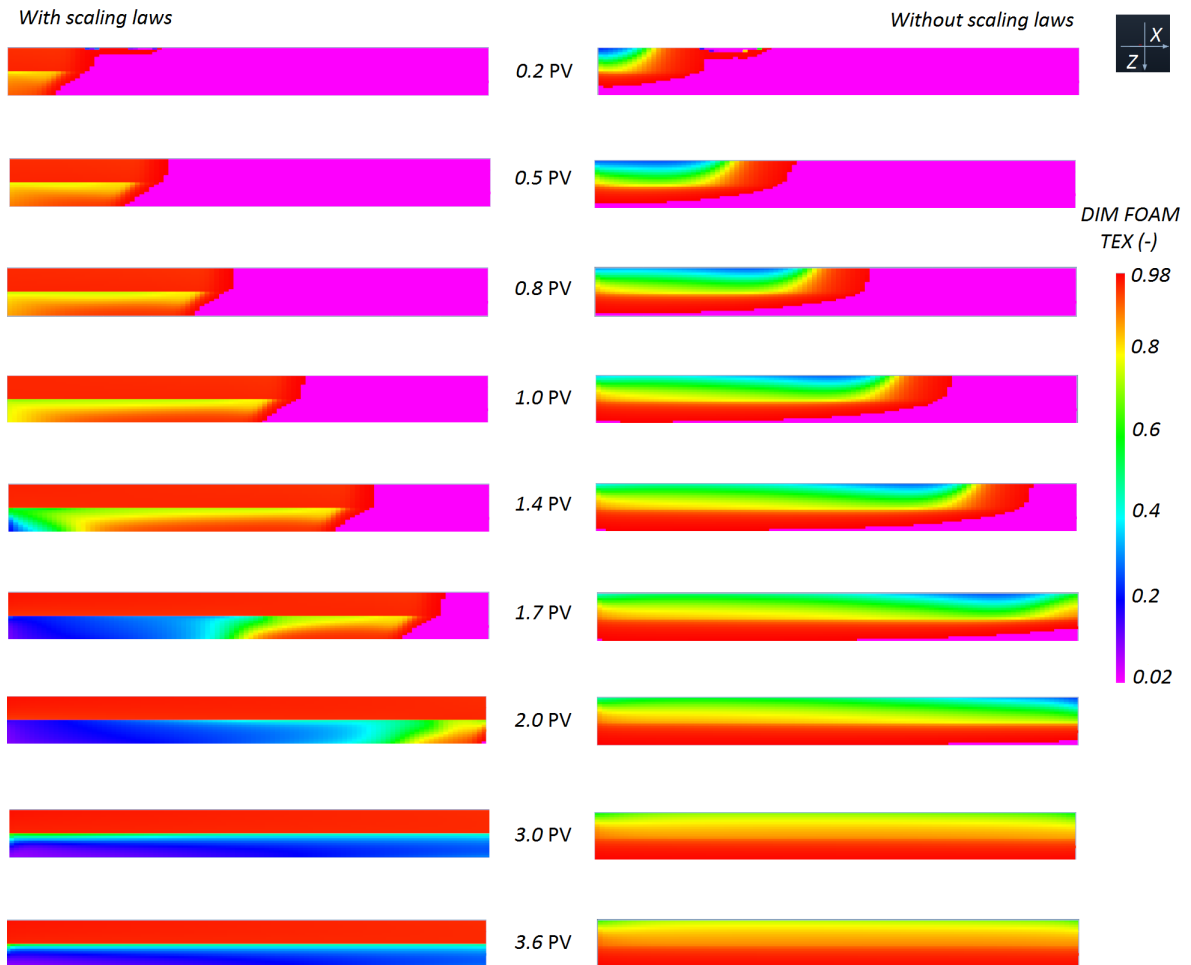


FIGURE 5.8 – Évolution de la texture adimensionnelle de la mousse ( $n_D = F_2$  sous l'hypothèse de l'équilibre local) à différents instants de l'injection : à gauche, les résultats avec les lois d'échelle observées et à droite sans tenant compte des lois d'échelle.

---

## 5.4 Conclusion

Les lois d'échelle, selon l'hypothèse dynamique et l'observation, ont un impact important sur les prévisions du déplacement de mousse dans un modèle de réservoir comportant des niveaux de perméabilités contrastés. Cet impact concerne à la fois les productions et la distribution des fluides et de la texture de la mousse au sein du réservoir. Ces lois d'échelle peuvent modifier, dans un sens ou un autre, le comportement de la mousse à grande échelle. Cela a été mis en évidence grâce à un modèle de simulation simple qui correspond à un réservoir bi-couche. Certes ce modèle est loin d'être représentatif d'un cas réel et ne nous permet pas de tirer de conclusion générale sur les effets escomptés de la mousse à grande échelle, cependant il indique clairement que les prévisions de performance d'un procédé à base de mousse, appliqué à un réservoir hétérogène, nécessitent une bonne connaissance des lois d'échelle du modèle de mousse avec la perméabilité. C'est pourquoi il serait utile de confirmer et préciser ces dernières à partir d'études expérimentales sur des milieux de propriétés contrastés.



# Conclusions générales et perspectives

Durant cette thèse, nous avons traité différents aspects de l'écoulement des mousses en milieu poreux dans le contexte de la récupération assistée du pétrole, afin de répondre aux objectifs de cette thèse qui sont principalement axés sur l'amélioration du paramétrage du modèle de mousse empirique. Le sujet a été abordé à diverses échelles, allant de l'écoulement des bulles dans des capillaires à l'écoulement de la mousse à l'échelle d'un pilote. Ici, nous présentons les principales conclusions de ce travail et nous proposons par la suite des perspectives pour cette étude.

Les résultats de la thèse peuvent être synthétisés comme suit :

- Une étude bibliographique approfondie des différentes techniques de modélisation des déplacements de mousse en milieu poreux nous a permis de mettre en évidence les avantages et les limitations des deux grandes familles de modèles. D'une part les modèles empiriques qui simulent la réduction de mobilité associée au déplacement d'une mousse au moyen d'un modèle de Darcy polyphasique étendu. Ces modèles sont basés sur une description macroscopique de la mousse en termes de réduction de mobilité du gaz sans chercher à décrire son comportement dynamique à l'échelle microscopique tel que la génération, la destruction et le transport des lamelles. La description est fondée sur une fonctionnelle d'interpolation multiparamétrique qui dépend des paramètres impactant la performance de la mousse. Cela leur confère une simplicité et un sens pratique essentiel pour les études de réservoir à grande échelle. Cependant, les fonctionnelles empiriques de ces modèles manquent de généralité et de fondement physique puisqu'elles ne font pas intervenir directement les mécanismes microscopiques responsables de la réduction de mobilité, et par conséquent, leur caractère prédictif est réduit à un espace paramétrique limité aux expériences de déplacement qui ont servi à calibrer ces modèles. D'autre part, les modèles à lamelles, qui prédisent les propriétés d'écoulement d'une mousse en milieu confiné de géométrie simple, concernent des géométries simples dans la littérature. La réduction de mobilité du gaz suivant ces modèles est donnée par des lois rhéologiques fonction de la densité des lamelles (ou texture), le paramètre essentiel dans le comportement de la mousse. Ce nouveau paramètre spécifique aux écoulements de mousse n'est

pas constant et est défini par des lois microscopiques de génération et de destruction des lamelles. Toutefois, la texture est invariante à l'équilibre local entre la génération et la destruction. C'est pourquoi les modèles à lamelles ont été mis à profit pour paramétrer les modèles empiriques.

- Nous avons montré que les deux modèles empirique et à lamelles sont équivalents et peuvent prédire les mêmes résultats à l'équilibre local. En effet, nous avons mis au point une méthode pour identifier les deux modèles via des lois de correspondance entre les paramètres des deux approches. Plus précisément, l'égalité entre la mobilité du gaz moussant, exprimée selon chaque modèle, nous a permis d'identifier les paramètres empiriques aux paramètres physiques microscopiques, notamment la texture de la mousse. Cette équivalence apporte un fondement physique aux modèles empiriques. De manière générale, elle permet de paramétrer facilement les modèles empiriques à partir de la relation entre la texture et la saturation en régime permanent. Finalement, la pertinence de cette équivalence a été étudiée en utilisant un modèle à lamelles calibré sur la base des données expérimentales de la littérature. Un très bon accord a été constaté entre les résultats des deux modèles.
- Nous avons appliqué la nouvelle procédure proposée, basée sur le parallèle avec un modèle en texture, pour calibrer le modèle de mousse empirique par rapport à des mesures de la viscosité apparente de la mousse en régime permanent pour différentes qualités de mousse, vitesses totales et perméabilités. Un modèle de viscosité du gaz moussant en tube capillaire, hérité des travaux de Bretherton étendus par Hirasaki et Lawson, a été adopté. Il nous a permis de transcrire les mesures de la viscosité apparente en termes de texture et de saturation. Ces couples texture-saturation permettent de calibrer les paramètres empiriques au moyen des lois de correspondance établies dans le cadre de cette thèse. Par ailleurs, une autre méthode de calibration disponible dans la littérature, basée sur la méthode des moindres carrés, a été appliquée aux mêmes mesures afin de comparer les deux méthodes. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont très satisfaisants et encourageants pour les deux milieux poreux homothétiques considérés dans cette étude. La calibration demeure cependant approximative pour des ensembles de données incomplets ou dispersés, tels que celui acquis sur un troisième poreux de faible perméabilité.
- La calibration du modèle de mousse sur différents milieux poreux, nous a permis d'étudier les lois d'échelle des paramètres empiriques avec la perméabilité selon deux hypothèses statique et dynamique de stabilité des lamelles. Les lois proposées dans cette thèse sont en accord avec les constats de la littérature et il paraît que l'hypothèse dynamique rend beaucoup mieux compte de ces effets d'échelle que l'hypothèse statique. Les lois d'échelle sont essentielles pour l'évaluation de la performance de la mousse à l'échelle d'un pilote qui explore le plus souvent des niveaux-réservoirs de perméabilités contrastées.
- Nous avons mis en évidence l'importance des lois d'échelle à partir de simulations de l'écoulement de mousse sur une coupe verticale de réservoir bi-couche montrant un contraste de perméabilité important. Nous avons trouvé que leur impact sur le comporte-

---

ment de la mousse à l'échelle du réservoir est tout à fait significatif. En effet, les données de puits et les cartes de saturation et de texture diffèrent considérablement par rapport au cas où le modèle de mousse est supposé invariant en fonction de la perméabilité. Ainsi, les lois d'échelle sont essentielles pour mieux prédire le comportement de la mousse, et donc pour mener une évaluation plus pertinente des procédés EOR basés sur la mousse, dans un réservoir hétérogène.

Pour conclure, nous avons mis au point une procédure robuste pour calibrer d'une manière fiable les modèles de mousse en régime permanent. Cette procédure a été mise au point et testée en deux étapes : en premier lieu, à partir d'un modèle en texture pré-calibré issu de la littérature, puis à partir des résultats d'expériences menées à IFPEN traduits en termes de texture. Enfin, nous avons proposé et interprété des lois d'échelle des paramètres du modèle de mousse en fonction de la perméabilité du milieu poreux, en analysant les paramètres des modèles calibrés sur des carottes de différentes perméabilités.

L'ensemble de résultats de cette thèse a fait l'objet de deux articles scientifiques publiés dans des journaux à comité de lecture (voir Annexe E), un brevet et des présentations orales et un poster :

- O. Gassara, F. Douarche, B. Braconnier, and B. Bourbiaux. Equivalence between semi-empirical and population-balance foam models. *Transport in Porous Media* (published), 2017.
- O. Gassara, F. Douarche, B. Braconnier, and B. Bourbiaux. Calibrating and interpreting implicit-texture models of foam flow through porous media of different permeabilities. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (published), 2017.
- O. Gassara, F. Douarche, B. Braconnier, and B. Bourbiaux. Procédé d'exploitation d'un gisement d'hydrocarbures par injection d'un gaz sous forme de mousse. Patent Filed to FR *Institut National de la Propriété Industrielle*, 2017.
- Présentation orale au congrès *13ème Journées d'Études des Milieux Poreux* (JEMP2016) qui s'est tenu à Côte Basque les 12 et 14 Octobre 2016.
- Présentation orale au congrès *Complexe Fluid Flow in Porous Media* (ComFlowPore15) qui s'est tenu à Bordeaux les 12 et 14 Octobre 2015.
- Poster à la rencontre scientifique *Microfluidics: from laboratory tools to process development* (RS-Microfluidics) qui s'est tenue à Rueil-Malmaison les 04 et 05 Novembre 2015.

**Perspectives.** Cette étude constitue une étape importante vers la mise en place d'un modèle de mousse prédictif indispensable pour les études de sensibilités destinées à optimiser les procédés EOR basés sur la mousse à l'échelle d'un champ pétrolier. Néanmoins, plusieurs aspects restent à explorer et nécessitent une étude plus approfondie, notamment

- Les lois d'échelle développées dans cette étude doivent être confirmées et étendues à des milieux poreux naturels de différentes structures et propriétés, à l'aide d'autres ensembles de données expérimentales plus détaillés et précis. En effet, le manque de mesures qui couvrent la zone de transition entre les régimes faible et haute qualité ne nous permet

pas de tirer une conclusion définitive concernant la validité de l'hypothèse dynamique de coalescence de la mousse qui sous-tend les relations de mise à l'échelle correspondantes établies dans ce document.

- L'ajustement des régimes transitoires de l'écoulement de mousse, conduisant aux états permanents, constitue l'étape suivante. celle-ci peut être abordée à partir d'essais disposant d'informations suffisantes (profils de saturation et de pression, les productions, etc.), dans le but d'enrichir et de contraindre davantage le modèle empirique, ce qu'il rende compte de l'impact des phénomènes de génération et de destruction de la mousse à l'échelle du réservoir.
- Les effets des autres paramètres impactant la performance de la mousse demeurent à étudier, à savoir la concentration en tensioactif, la saturation en huile et également le gradient de pression minimal pour la génération de la mousse qui n'est pas intégré dans la version actuelle du modèle. Compte tenu des applications pétrolières du modèle, l'ajustement de la fonction d'interpolation  $F_3$  à partir des mesures de déplacements de mousse en présence d'huile est essentiel.
- L'étude de l'effet de l'adsorption du tensioactif sur la performance de la mousse car en pratique des quantités limitées de tensioactif sont généralement injectées dans le réservoir. En particulier, des lois d'échelle de l'adsorption du tensioactif avec la perméabilité du milieu poreux sont à étudier.



## Annexe A

# Vérification de la loi de pression associée à une bulle dans un canal rectangulaire

**Expériences micro-fluidiques.** Dans le cadre de l'étude des propriétés de l'écoulement des mousses dans les dispositifs micro-fluidiques, Quennouz *et al* [93] ont réalisé une étude expérimentale en utilisant le système micro-fluidique M14, montré en Figure A.1. L'idée était de réaliser un système micro-fluidique moussant et d'effectuer des mesures pour la caractérisation des écoulements de bulles de gaz. Nous exploitons ces données expérimentales pour vérifier la loi de pression (loi de Bretherton généralisée) associée à une bulle de gaz dans ces systèmes.

Le processus de formation des bulles mis en place correspond à la co-injection de gaz et d'eau à travers une jonction en croix (notée «foam generator» en Figure A.1). La formation de mousse est contrôlée et caractérisée en pilotant les pressions d'injection d'eau et de gaz tout en amont du dispositif micro-fluidique. Durant ces expériences, l'agent moussant SDS (Sodium n-Dodecyl Sulfate) est ajouté à la phase aqueuse (fraction massique de 1%) pour assurer la stabilité des films liquides. Le gaz injecté est l'azote, de sorte que la tension interfaciale entre les deux fluides injectés est de l'ordre de 30 mN/m. Notons que les trois canaux de sortie de ce

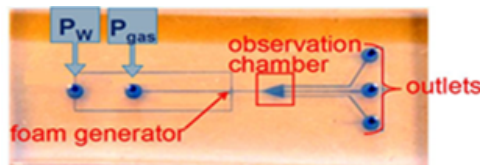


FIGURE A.1 – Système micro-fluidique M14 [93].

dispositif présentent la même longueur  $L = 6.3$  mm, la même profondeur  $h = 47$   $\mu\text{m}$  et trois largeurs différentes  $w = 124.7, 65.3$  et  $30.4$   $\mu\text{m}$ . L'écoulement des bulles a été caractérisé dans

chaque canal de manière indépendante, c'est-à-dire que seul le canal considéré avait une sortie ouverte. L'expérience consiste non seulement en des mesures directes, obtenues à partir d'un débitmètre et d'un contrôleur de pression, mais également l'acquisition d'images par caméra rapide dont la fréquence d'acquisition était de 2000 images par seconde. Cette dernière a permis de caractériser précisément la vitesse des bulles dans les canaux, ainsi que d'autres paramètres tels que la longueur et le nombre des bulles présentes dans le canal, la fraction du gaz, etc. Chaque essai était caractérisé par un couple donné des valeurs de pression d'eau et de pression de gaz imposées en amont. Les conditions opératoires induisent des comportements distincts des bulles. À titre d'exemple, la figure A.2 montre les formes de bulles de gaz développées dans le cas du grand canal. Nous remarquons que plus l'écart entre la pression d'eau  $P_w$  et la pression du gaz  $P_g$  est important, plus les bulles sont nombreuses et petites.

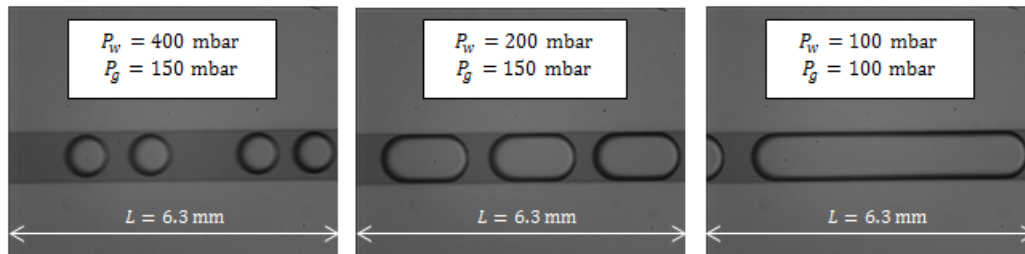


FIGURE A.2 – Forme des bulles de gaz à différentes combinaisons de  $P_w$  et  $P_g$  dans le cas du grand canal.

**Correction des pertes de charges.** Les valeurs de la différence de pression mesurée entre l'entrée et la sortie du dispositif expérimental sont corrigées afin de soustraire la perte de charge due à la résistance hydraulique  $R_H$  des tubes d'injection en amont du système micro-fluidique. En effet, le système d'injection en amont est relié au dispositif micro-fluidique par des tubes (de même longueur pour la solution moussante et le gaz) comme l'indique la figure A.3. La perte de charge  $\Delta P_{\text{amont}}$  dans ces tubes d'entrée est déterminée à partir de la relation  $\Delta P_{\text{amont}} = R_H Q_w$ , où  $Q_w$  désigne le débit volumique du liquide. La valeur de la résistance  $R_H$  utilisée dans toute la suite est  $18.4 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$  [119].

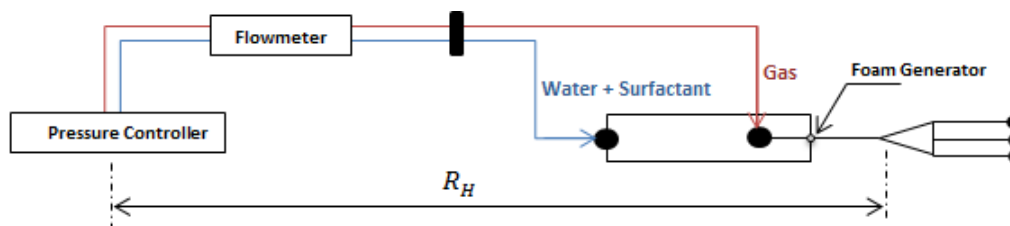


FIGURE A.3 – Schéma du montage expérimental en amont du système micro-fluidique.

---

## Résultats et discussions

**Écart de pression associé à une bulle.** L'équation (2.21) de la différence de pression totale peut s'écrire sous la forme

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_l + n_b \Delta P_{\text{bulle}} \\ &= \frac{aL_s \alpha \mu_w}{h^2} u + n_b \left[ \frac{bL_B \alpha \mu_w}{h^2} u + \frac{c\sigma}{h} \left( \frac{\mu_w u}{\sigma} \right)^{2/3} \right]\end{aligned}\quad (\text{A.1})$$

Par conséquent, l'écart de pression associé à une bulle peut être déterminé expérimentalement comme

$$\Delta P_{\text{bulle}} = \frac{\Delta P - \Delta P_l}{n_b} \quad (\text{A.2})$$

Or,  $\Delta P_l$  qui désigne la contribution des bouchons de liquide peut être approximée par la loi linéaire  $\Delta P \propto Q$  relative à un fluide newtonien, soit [89]

$$\Delta P_l = \frac{aL_s \mu_w}{wh^3} Q \quad (\text{A.3})$$

où  $a$  désigne à nouveau un coefficient (voir équation (2.20)),  $L_s$  la longueur totale des bouchons de liquide et  $Q$  le débit total dans le canal.  $Q = uwh$ , où  $u$  est la vitesse des bulles, si la vitesse d'écoulement du liquide est égale à celle de la bulle, i.e.  $\alpha = 1$ . Par conséquent, pour chaque mesure de  $\Delta P$ , nous déterminons  $\Delta P_{\text{bulle}}$  en utilisant les équations (A.2) et (A.3). Les résultats obtenus pour les trois canaux sont montrés en Figure A.4. L'ajustement des données expérimentales par une seule loi de puissance montre que  $\Delta P_{\text{bulle}}$  varie en  $u^{2/3}$ , qui est en accord avec la loi de pression proposée par Bretherton [32] pour des capillaires de section circulaire et étendue pour des sections rectangulaires par Wong *et al* [86, 87] et Fuerstman *et al* [88]. De plus, nous trouvons que le terme en  $bu$  dans l'équation (A.1) est négligeable, comme démontré par Hourtané *et al* [91, 92] et par Parthiban et Khan [90].

Nous pouvons également ajuster séparément les données expérimentales de chaque canal en raison de la dépendance du coefficient de proportionnalité  $c$  aux dimensions de la section de passage des bulles. Nous avons trouvé les pentes 0.63, 0.65 et 0.60 pour le grand canal, le moyen canal et le petit canal, successivement. Cette analyse nous a permis de déterminer aussi la valeur du paramètre empirique  $c$  de l'équation (A.1). Nous trouvons une valeur de  $c = 19$  pour le grand canal (de largeur  $w = 124.7 \mu\text{m}$ ),  $c = 21$  pour le moyen canal (de largeur  $w = 65.3 \mu\text{m}$ ) et  $c = 29$  pour le petit canal (de largeur  $w = 30.4 \mu\text{m}$ ). Nous rappelons que la profondeur de tous les canaux est  $h = 47 \mu\text{m}$  et la longueur est  $L = 6.3 \text{ mm}$ . Hourtané *et al* [91, 92] ont trouvé les valeurs suivantes :  $c = 34$  pour un canal de dimensions  $250 \times 300 \mu\text{m}$  et  $c = 25$  pour un autre de dimensions  $100 \times 100 \mu\text{m}$ .

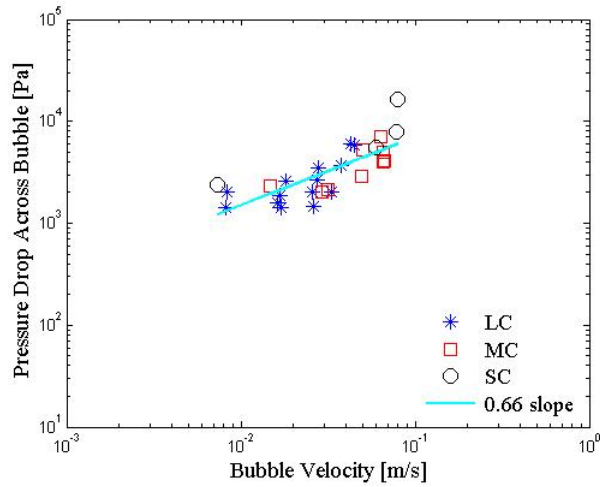


FIGURE A.4 – Écart de pression  $\Delta P_{\text{bulle}}$  associé à une bulle en fonction de la vitesse de la bulle  $u$  pour les trois canaux. Les symboles sont les données expérimentales interprétées (LC désigne le grand canal, MC le moyen canal, et SC le petit canal) et le trait continu représente l’ajustement des données par une seule loi de puissance. L’ajustement montre que  $\Delta P_{\text{bulle}}$  varie  $u^{2/3}$ .

**Viscosité effective du gaz.** Les différences de pression totales  $\Delta P$ , mesurées pour chaque canal micro-fluidique, ont été utilisées pour calculer la viscosité effective du gaz  $\mu_g^f$  comme

$$\mu_g^f = \frac{h^2}{an_b L_B} \frac{\Delta P - \Delta P_l}{u} \quad (\text{A.4})$$

Les résultats obtenus sont montrés en Figure A.5. D’une part, l’ajustement des données à nombre de bulles similaire, par une loi de puissance, montre une variation de  $\mu_g^f$  proche de  $u^{-1/3}$  pour les trois canaux, ce qui est en accord avec le modèle proposé par Fuerstman *et al.* D’autre part, les résultats montrent également un ordre de classement acceptable de la viscosité effective du gaz selon la perméabilité des canaux :  $\mu_g^f$  est beaucoup plus importante dans le grand canal (le plus perméable) ce qui est cohérent avec les effets attendus de la mousse dans des milieux poreux de différentes perméabilités.

**Conclusions et recommandations.** Dans cette annexe, nous avons pu transcrire les mesures micro-fluidiques d’un écoulement de train de bulles en des mesures de la perte de charge associée à une seule bulle et en viscosité effective du gaz. Cela est très important pour mettre en pratique les mesures micro-fluidiques et étudier les lois microscopiques régissant l’écoulement de la mousse en milieu poreux. Nous avons constaté un accord qualitatif avec les lois connues de la littérature. Nous retiendrons que, dans un canal droit, l’écart de pression de part et d’autre d’une bulle est proportionnel à la puissance 2/3 de la vitesse du gaz et que la viscosité effective du gaz varie comme la puissance -1/3 de la vitesse à densité de bulles (texture) donnée.

Cette interprétation de mesures micro-fluidiques offre des perspectives de développement,

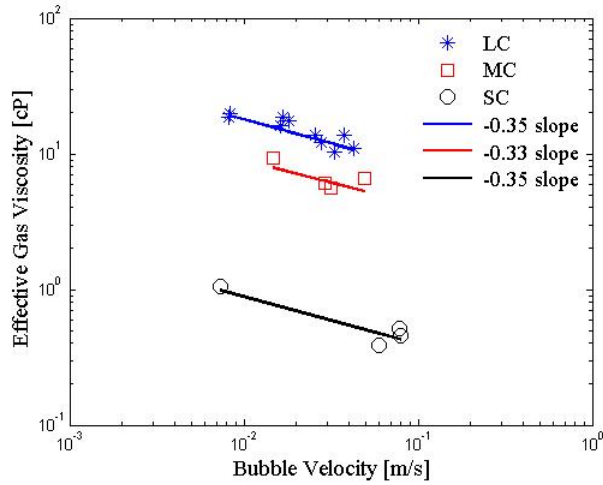


FIGURE A.5 – Viscosité effective du gaz  $\mu_g^f$  en fonction de la vitesse de la bulle  $u$  à nombre de bulles  $n_b$  similaire :  $n_b = 3 - 4$  pour le grand canal (LC) et  $n_b = 1$  pour le moyen (MC) et petit canal (SC). L’ajustement des données pour chaque canal montre une variation de  $\mu_g^f$  proche de  $u^{-1/3}$  pour les trois canaux.

dont nous évoquons quelques exemples bien qu’en dehors du cadre de cette thèse : (1) des mesures avec d’autres dispositifs d’injection (générant des tailles de bulle contrôlées), et/ou d’autres agents moussants permettraient de quantifier l’impact du nombre de bulles sur la viscosité effective du gaz à vitesse des bulles fixée, (2) le dispositif expérimental et/ou les conditions opératoires pourraient être adaptés afin de simuler les conditions de déplacement dans des canaux de différentes dimensions et sur des intervalles de vitesse plus larges et (3) effectuer des mesures de référence en absence de tensioactif (gaz sous forme continue) afin, par différence, de véritablement quantifier l’impact des lamelles (films) sur la réduction de mobilité du gaz s’écoulant sous forme de mousse.