

# écupération assistée par la mousse

La consommation énergétique mondiale ne cesse de croître sous l'effet de l'augmentation de la population mondiale et de la croissance économique des pays émergents, notamment la Chine et l'Inde. Cette demande est en grande partie pourvue par la production d'hydrocarbures, à savoir le pétrole et le gaz naturel. Le monde consomme actuellement 95 millions de barils de pétrole par jour contre 76 millions en 2000, soit donc un taux d'augmentation de 1.2 % par an [2]. Toutefois, pour 5 barils de pétrole consommés par jour, seulement un nouveau baril est découvert. Pour satisfaire ces besoins dans ce contexte de plus en plus difficile, trois solutions s'imposent pour les compagnies pétrolières : (1) valorisation des ressources existantes par recours à des techniques de production plus avancées, (2) étendre le champ d'investigation à de nouveaux espaces tels que les horizons géologiques sous-marins très profonds et les zones arctiques, et (3) exploitation des ressources non-conventionnelles.

Pour des raisons pratiques et environnementales, plusieurs intervenants du secteur se sont engagés à développer la première solution afin d'améliorer les taux de récupération des gisements exploités. Pour ce faire, ils ont proposé diverses méthodes de récupération non classiques dites méthodes de récupération assistée du pétrole (EOR en abréviation anglaise pour –Enhanced Oil Recovery–).

L'exploitation des gisements pétroliers repose traditionnellement sur deux phases, dites respectivement récupération primaire, d'une part, et récupération secondaire, d'autre part. En effet, la production est dite primaire lorsque le pétrole est produit sous la seule action de l'énergie naturelle présente in situ. Ce mode de production appelé drainage naturel résulte principalement de l'expansion des fluides du gisement sous l'effet de la diminution de la pression au niveau des pores de la formation. Cette expansion concerne l'huile saturée ou non en gaz, le gaz libre éventuel et l'eau de l'aquifère (si présent et actif). La récupération par drainage naturel ne dépasse généralement pas 20 % des hydrocarbures initialement en place. Cette phase de production reste nécessaire puisqu'elle représente une première observation du comportement du

gisement et fournit donc les renseignements indispensables pour la planification de la production ultérieure.

Après l'épuisement de l'énergie naturelle du gisement, un apport extérieur d'énergie est nécessaire pour assurer la production. Spécifiquement, des fluides sont injectés dans le gisement par un ou plusieurs puits injecteurs dans le but de déplacer les hydrocarbures vers des puits de production. L'eau et le gaz sont fréquemment utilisés comme des fluides de déplacement. Toutefois, leurs efficacités sont limitées à cause de phénomènes préjudiciables aux déplacements des fluides dans les milieux poreux. Par conséquent, les taux de récupération à l'issue de la phase de production secondaire ne dépassent pas les 40 – 50%. La récupération durant cette phase d'injection est impactée par la disposition des puits, les effets de la pesanteur, l'hétérogénéité du réservoir, le piégeage capillaire et finalement le contraste de mobilité entre le fluide déplaçant et le fluide déplacé qui peut générer des instabilités visqueuses. Les effets des hétérogénéités, de pesanteur et du contraste de mobilité, qui nous intéressent dans le cadre de cette thèse, sont examinés ci-après.

**Effets des hétérogénéités.** Les hétérogénéités du réservoir influent sur la façon par laquelle le front de déplacement du fluide injecté avance. En effet, le déplacement d'un fluide est plus lent dans les zones les moins perméables, alors qu'il est plus rapide dans les zones de forte perméabilité tel que par exemple le réseau des fractures dans le réservoir. Il s'agit donc de voies de cheminement préférentiel pour le fluide déplaçant entre les puits injecteurs et producteurs. Ainsi l'huile reste piégée dans les zones de faible perméabilité demeurant mal balayées. Par conséquent, les hétérogénéités du réservoir contribuent à la déstabilisation du front de déplacement et à la percée précoce du fluide injecté, et sont responsables d'une perte importante de la récupération.

**Effet de la pesanteur.** Les forces de pesanteur provoquent une ségrégation verticale des fluides selon leurs densités. Ce phénomène peut avoir un effet néfaste sur le taux de récupération. Considérons par exemple une section verticale entre un puits injecteur et producteur. Si le fluide injecté est le gaz, il atteindra le puits producteur en cheminant dans les parties supérieures de la section par effet de densité, et donc la partie inférieure de la section reste mal ou non balayée.

**Phénomènes d'instabilité visqueuse.** Les effets des hétérogénéités combinés aux effets de la pesanteur sont souvent accentués par des phénomènes dits d'instabilités visqueuses. Définissons tout d'abord la notion de mobilité d'un fluide 1 en écoulement dans un milieu poreux comme son aisance à se déplacer et à avancer dans le réseau des pores en présence d'un autre fluide 2. Dans le cadre d'un écoulement darcyen, la mobilité d'un fluide 1 est donnée par le rapport de sa perméabilité relative par sa viscosité. Pour illustrer, considérons le cas simple où le fluide 1 se déplace verticalement du bas vers le haut dans un milieu poreux homogène contenant le fluide 2. Supposons que la masse volumique  $\rho_1$  du premier fluide est supérieure à  $\rho_2$  celle du deuxième fluide. Théoriquement, la surface qui sépare les deux fluides demeure plane et horizontale tout au long du déplacement. Ce type de déplacement est appelé déplacement stable. Or l'expérience

montre que réellement le phénomène se déroule d’une manière totalement différente à cause des facteurs perturbants comme la présence d’une hétérogénéité locale. Ainsi, la surface séparant les deux fluides se déforme montrant une petite avancée locale à l’intérieur du fluide 2 comme le montre la figure 1 (b). À cet instant, deux forces interviennent sur la propagation de cette digitation : la pesanteur qui va tendre à résorber cette avancée et les forces visqueuses dont l’effet est contrôlé par le rapport de mobilité entre les deux fluides. Si la mobilité du fluide 1 est inférieure à celle du fluide 2, la petite digitation aura tendance à progresser moins vite que le fluide déplacé, et dans ce cas, les forces visqueuses comme la pesanteur tendent à atténuer l’avancée du fluide 1 et homogénéiser (à aplanir) la surface qui sépare les deux fluides. Par contre, si la mobilité du fluide 1 est supérieure à celle du fluide 2, la digitation aura tendance à s’écouler plus vite que le fluide 2 et à créer des nouvelles digitations.

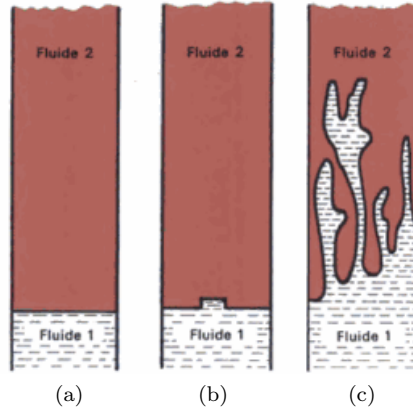


FIGURE 1 – Formation et croissance de digitations visqueuses sous forme de doigts : (a) état initial et profil théorique, (b) formation d’une digitation en raison d’une hétérogénéité locale et (c) digitations visqueuses développées [3].

Plus précisément, le problème de stabilité du déplacement illustré par la figure 1 peut être étudié par comparaison des influences des forces de pesanteur et des forces visqueuses. Sachant que les forces de viscosité sont d’autant plus importantes que la vitesse de filtration\* est plus grande, il a été démontré qu’il existe une vitesse de filtration critique  $u_c$  donnée par [4, 5, 6]

$$u_c = \frac{(\rho_1 - \rho_2) |\mathbf{g}|}{\frac{\mu_1}{k_1} - \frac{\mu_2}{k_2}} \quad (1)$$

où, pour chaque fluide  $i$ ,  $\rho_i$  désigne sa masse volumique,  $\mu_i$  sa viscosité,  $k_i$  sa perméabilité effective ;  $|\mathbf{g}|$  est la valeur absolue de l’accélération de la pesanteur. Si la vitesse de filtration du déplacement  $u$  est inférieure à  $u_c$ , le déplacement est dit stable puisque dans ce cas les petites perturbations de la surface ont tendance à se résorber et donc la surface ou bien le front séparant les deux fluides reste plane et horizontale. Mais si la vitesse de filtration  $u$  est supérieure

\*. La vitesse de filtration est définie comme la vitesse macroscopique fictive d’un fluide en mouvement à travers un milieu poreux saturé.

à la vitesse critique  $u_c$ , le déplacement est dit instable car les petites perturbations tendent à s'amplifier en formant des doigts qui pénètrent dans le fluide 2 comme illustré par la figure 1 (c). Ces phénomènes d'instabilité décrits plus haut dans un cas simple peuvent se produire dans tous les déplacements de fluides miscibles ou non miscibles quelle que soit la géométrie de l'écoulement et à toutes les échelles aussi bien celle des pores que celle du gisement où elles sont potentiellement encore amplifiées par l'hétérogénéité macroscopique («channeling»).

**Efficacité d'une injection.** L'influence de ces phénomènes préjudiciables à une opération d'injection est généralement traduite par la notion d'efficacité globale  $E_T$  du procédé. Celle-ci est équivalente au taux de récupération, défini comme le rapport de la quantité d'hydrocarbures extraits en conditions de fond à la quantité initialement en place.  $E_T$  peut être formulé comme le produit des trois efficacités suivantes (cf. Figure 2) :

$$E_T = \underbrace{E_S \times E_V}_E \times E_D \quad (2)$$

avec :

- $E_S$  efficacité superficielle (dans le plan des couches) : c'est le rapport entre la surface balayée par le front et la surface totale de la couche.
- $E_V$  efficacité verticale (dans une section orthogonale au plan des couches) : elle est définie comme la surface balayée par le front divisée par l'aire totale de la section verticale. Le produit  $E_S \times E_V$  est appelé efficacité du balayage volumétrique et est noté  $E$  dans la suite.
- $E_D$  efficacité du déplacement à l'échelle des pores dite aussi efficacité microscopique : c'est le rapport de la quantité d'hydrocarbures effectivement déplacés sur la quantité initialement présente dans la zone balayée.  $E_D$  est régie essentiellement par les saturations irréductibles en eau et en huile. En particulier, en raison des forces de capillarité associées à l'écoulement de fluides non miscibles, une saturation résiduelle en huile reste piégée entre les pores de la roche à la fin d'une injection d'eau ou de gaz.  $E_D$  vaut 1 dans le cas d'un déplacement par fluides miscibles.

Dans ce contexte, la récupération tertiaire par recours aux méthodes EOR a été proposée afin d'améliorer l'efficacité globale  $E_T$  d'une injection. Tout procédé EOR devra donc répondre à l'un des impératifs suivants :

- amélioration du balayage volumétrique grâce à un rapport de mobilité favorable entre fluides déplaçant et déplacé et par atténuation des effets de la pesanteur et des hétérogénéités,
- amélioration du déplacement microscopique par réduction, ou mieux par élimination, des forces capillaires qui retiennent l'huile dans les restrictions de pores de la formation dont l'idée de base est l'obtention de la miscibilité entre les deux fluides.

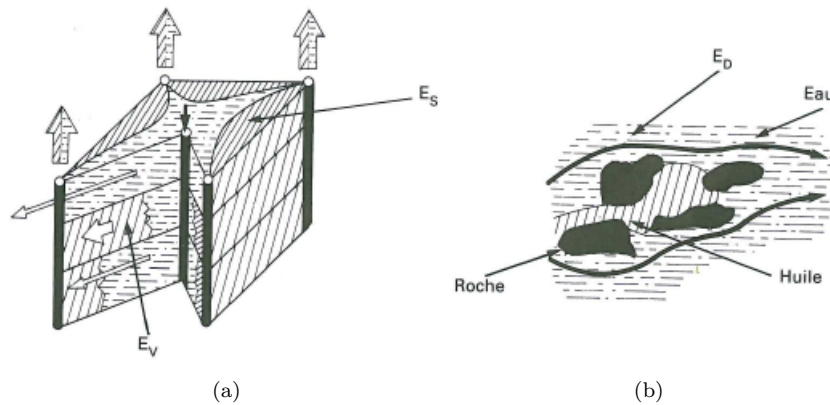


FIGURE 2 – Notion d'efficacité globale d'une injection : (a) efficacité du balayage volumétrique et (b) efficacité du déplacement à l'échelle des pores (adaptée de Cossé (1988) [7]).

Les méthodes EOR sont classées le plus souvent en trois catégories : l'injection du gaz miscible, les méthodes chimiques par l'ajout de produits chimiques dans les fluides injectés comme des polymères et des tensioactifs, et finalement les méthodes thermiques qui ont pour objectif de réduire la viscosité de l'huile en place. L'efficacité de ces méthodes est en général très supérieure à celle d'un drainage naturel suivi par une récupération secondaire. Les taux de récupération finaux peuvent atteindre, dans certains cas, 70 % [8].

**La mousse améliore l'efficacité du balayage volumétrique.** Durant la récupération secondaire par injection de gaz, les trois phénomènes décrits plus haut sont observés et engendrent des cheminements préférentiels pour le gaz dans un gisement d'huile, ce qui contribue à une percée précoce du gaz injecté et par conséquent à une réduction de l'efficacité du balayage. De ce fait, certaines zones du gisement sont mal balayées par le fluide déplaçant comme le montre la figure 3.

Une amélioration de l'efficacité volumétrique du balayage par le gaz est possible en réalisant une injection alternée d'eau et de gaz (dite WAG pour – Water Alternating Gas –). En effet, suivant cette configuration, l'eau ayant tendance à balayer les parties basses du gisement et le gaz les parties hautes, et ainsi optimiser l'efficacité verticale du déplacement (cf. Figure 3). De nombreuses améliorations du WAG ont été proposées dont la plus connue est l'ajout de tensioactifs dans l'eau afin de former la mousse in situ. Les travaux de Bond et Holbrook (1958) [9] montrent que les mousses peuvent améliorer davantage l'efficacité du balayage d'une injection d'eau et de gaz dans un réservoir pétrolier. En effet, la dispersion de gaz dans une solution de tensio-active que constitue la mousse est connue pour être un bon agent de réduction de mobilité du gaz dans le milieu poreux [10, 11, 12]. Cet effet résulte de l'augmentation de la viscosité effective du gaz transporté sous forme de mousse. De ce fait, la mousse remédie aux instabilités associées à l'injection du gaz et stabilise encore le front de déplacement, comme l'illustre la

figure 3.

La mousse a également pour effet d'immobiliser ou piéger le gaz qui la constitue dans les pores qu'elle envahit. Ceci a pour effet de réduire la section d'écoulement du gaz et d'augmenter la résistance à l'écoulement de la mousse mobile. À plus grande échelle, la mousse peut de cette façon bloquer l'écoulement du gaz dans les zones les plus perméables et le dévier vers les zones mal balayées du réservoir qui contiennent l'huile piégée après l'injection du gaz et/ou de l'eau. Ainsi, la mousse atténue l'effet des hétérogénéités et la ségrégation gravitaire du fluide déplaçant.

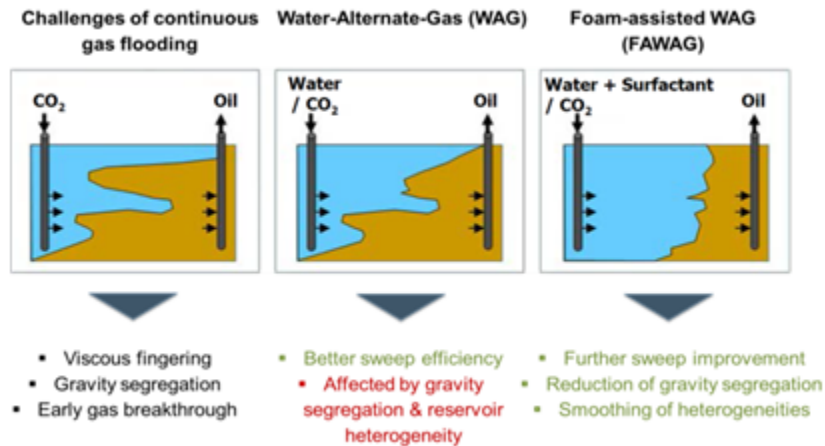


FIGURE 3 – Comparaison schématique, sur une section verticale de l'inter-puits d'un gisement, de l'efficacité volumétrique de balayage d'une injection de gaz, d'une injection alternée eau-gaz et d'une injection de mousse.

Les effets favorables de la mousse peuvent se résumer en :

- une stabilisation du front de déplacement à petite échelle par réduction de la mobilité du gaz et par conséquent la réduction des digitations visqueuses,
- une atténuation des effets des hétérogénéités du réservoir, par blocage des zones à forte perméabilité et déviation des fluides vers les couches moins perméables,
- et une limitation de la ségrégation gravitaire ; en présence de mousse, le gaz est dispersé dans l'eau sous forme de petites bulles maintenues par les films d'eau, ce qui viscosifie le gaz et ralentit ainsi son écoulement ascendant dans une coupe verticale par l'effet de la gravité.

En conséquence, la mousse retarde la percée du fluide déplaçant et améliore l'efficacité de balayage à toutes les échelles. Il convient de noter que la mousse peut améliorer aussi l'efficacité du déplacement microscopique par réduction de la tension interfaciale eau-huile suite à la présence du tensioactif dans la phase aqueuse. Cependant, divers facteurs liés aux fluides, au milieu poreux et aux conditions d'écoulement peuvent compromettre la stabilité de la mousse et réduire les bénéfices attendus sur le déplacement. Ces facteurs demeurent mal appréhendés et font l'objet de travaux de recherche. C'est le cas notamment des interactions entre la mousse et l'huile.

---

**Motivations et objectifs de la thèse.** Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse au procédé de récupération EOR basé sur la mousse comme un agent de contrôle de mobilité du gaz. Des essais pilotes de ce procédé sur gisement ont donné des résultats satisfaisants, confirmant ainsi les observations au laboratoire [9, 13, 14, 15, 16]. Néanmoins, la mise au point de cette technique comme un procédé de récupération nécessite encore plusieurs travaux de recherche théorique et expérimentale.

Les modèles de simulation de réservoir sont couramment utilisés par les compagnies pétrolières pour le développement de nouveaux projets, ainsi que pour les projets en cours, dans la mesure où ils aident à prendre des décisions d’investissement. En effet, ces modèles permettent de faire des calculs destinés à représenter le comportement des gisements, de prévoir la récupération d’hydrocarbures et d’optimiser l’exploitation du gisement par un emplacement de nouveaux puits et par un choix du meilleur procédé de récupération d’un point de vue technique et économique. En particulier, la faisabilité d’une injection de mousse est évaluée à partir de telles simulations, ce qui suppose de disposer d’un modèle de déplacement de mousse prédictif. Toutefois, la modélisation des déplacements basés sur la mousse demeure à ce jour un défi pour les compagnies pétrolières en raison du comportement complexe de la mousse dans les milieux poreux.

Les modèles qui sont répertoriés dans la littérature, peuvent être classés suivant deux approches différentes : une première, dite empirique qui vise à reproduire les observations au laboratoire en régime permanent, et une deuxième approche fondée sur la physique de l’écoulement des mousses à l’échelle des pores (génération, destruction et transport des lamelles). Cependant, aucune des deux ne répond au besoin de simulation prédictive à l’échelle du réservoir : d’une part, l’approche en texture repose sur trop d’approximations et ses lois microscopiques font intervenir une multitude de paramètres qui sont très difficiles à obtenir expérimentalement, et d’autre part, les modèles empiriques manquent de généralité et de fondement physique. Les fonctions empiriques de tels modèles devraient ainsi être calibrées à partir de multiples expériences de déplacement permettant de quantifier les effets de chacun des nombreux paramètres impactant la performance de la mousse, tels que la qualité et la texture de la mousse, la vitesse d’écoulement, la concentration en tensioactif, la saturation en huile, et la perméabilité et la porosité du milieu poreux. La calibration de ces lois empiriques doit donc être réalisée au cas par cas, c’est-à-dire en faisant varier, un par un, chacun des paramètres impactant la performance de la mousse. Or, la possibilité de réaliser de très nombreux essais au laboratoire est limitée pour des raisons évidentes de coût et de temps. Néanmoins, la mise à disposition d’un modèle prédictif est indispensable pour garantir la fiabilité des études de sensibilité destinées à optimiser le procédé à l’échelle du champ. D’où la motivation de ce sujet de thèse qui s’inscrit dans la continuité des travaux de recherche traditionnellement menés par les ingénieurs de réservoir. L’objectif principal de cette thèse est l’amélioration du paramétrage du modèle de mousse empirique, en donnant une meilleure compréhension des sujets de recherche suivants :

- appréhender l’écoulement des bulles de gaz à l’échelle des pores à partir de résultats expérimentaux obtenus par ailleurs à IFPEN sur des dispositifs de micro-fluidique. Nous

cherchons à valoriser/exploiter ce type de mesures dans le cadre de la modélisation des écoulements de mousse en milieu poreux, et aussi, proposer des recommandations pour les prochains travaux à mener au laboratoire,

- apporter un fondement physique au modèle de mousse empirique des simulateurs industriels, dont nous souhaitons conserver la structure fonctionnelle bien adaptée aux études de réservoir à grande échelle. Il s’agit notamment de faire évoluer les modèles empiriques à la lumière de modèles physiques à population de lamelles (ou bulles) pour accroître leur caractère prédictif,
- mettre au point des méthodes de calibration déterministes des modèles empiriques en se reposant sur les lois physiques de l’écoulement des mousses en régime stationnaire. Il s’agit de réduire le degré d’indétermination des modèles empiriques au moyen de méthodes de calibration fondées sur la physique du déplacement des lamelles en milieu poreux. Ces nouvelles méthodes de calibration seront validées et comparées à d’autres méthodes existantes dans la littérature à partir d’un nombre limité d’expériences de déplacement de mousse au laboratoire,
- proposer des lois d’échelle des paramètres du modèle de mousse en fonction des perméabilités de faciès et mettre en évidence leur intérêt pratique. Ces lois d’échelle sont essentielles pour l’évaluation de la performance d’un procédé mousse à l’échelle d’un pilote qui explore le plus souvent des niveaux-réservoirs à perméabilité contrastée.

**Plan de la thèse.** Ce manuscrit de thèse débute par un rappel des caractéristiques essentielles des mousses dans les milieux poreux. En particulier, les facteurs impactant le comportement rhéologique de la mousse ainsi que les mécanismes de la réduction de mobilité du gaz sont présentés et analysés dans le premier chapitre.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, une synthèse bibliographique des différentes techniques de modélisation de mousse nous amène à confronter deux grandes familles de modèles, les modèles empiriques et les modèles à lamelles (en texture), dont nous mettons en évidence les points forts et les lacunes en vue d’ébaucher des voies d’amélioration du modèle empirique qui sous-tend le simulateur de réservoir de l’IFPEN.

Dans le troisième chapitre, nous établissons l’équivalence entre les deux modèles de mousse empirique et à lamelles sous l’hypothèse d’équilibre local. Cette équivalence est fondée sur des lois d’identification reliant les différents paramètres des deux approches. Ensuite, nous explicitons la résolution de l’écoulement de mousse selon chaque modèle, en particulier le modèle à lamelles qui implique un nouveau paramètre d’écoulement qui est la texture. Par ailleurs, nous mettons en pratique l’équivalence établie dans ce chapitre en considérant un modèle à lamelles pré-calibré par rapport à des données de mousse de la littérature. Finalement, nous comparons les résultats du modèle empirique avec les prévisions numériques qui sont utilisées en pratique à des échelles plus importantes.

Dans le quatrième chapitre, nous donnons tout d’abord un aperçu sur les procédures de calibration des modèles empiriques qui sont proposées dans la littérature et indiquons les limi-



---

tations de chacune. Ensuite, nous présentons une nouvelle méthodologie, basée sur l'utilisation des modèles physiques en texture comme intermédiaire pour calibrer le modèle empirique. Cette méthodologie est évaluée par application à des séries de mesures sur des grès de Fontainebleau de différentes perméabilités. Finalement, nous analysons l'impact de la perméabilité sur les paramètres du modèle en vue d'identifier des lois d'échelle de la mousse dans un réservoir hétérogène. Cette analyse est menée selon plusieurs points de vue et hypothèses.

Dans le cinquième chapitre, nous mettons en évidence l'intérêt pratique des lois d'échelle des paramètres de mousse avec la perméabilité proposées dans le chapitre précédent à partir de simulations de l'écoulement de mousse dans une section de réservoir bi-couche à fort contraste de perméabilité. Les résultats sont ainsi confrontés à ceux obtenus avec un modèle de mousse uniforme et invariant en fonction de la perméabilité. Les comparaisons portent sur les productions aux puits et sur les cartes de saturation et de texture à différents instants de l'injection.

Finalement, nous résumons les principales contributions de la thèse et nous proposons des recommandations pour les prochains travaux qui peuvent y faire suite.



# Chapitre 1

## Écoulement des mousses en milieu poreux

Les mousses sont couramment utilisées dans de nombreux domaines tels que l'alimentation, le transport, la construction, la sécurité et la médecine. Son application a été proposée depuis des décennies dans le domaine pétrolier. En effet, les travaux de laboratoire et les essais pilote montrent l'intérêt économique de l'injection de mousse comme un agent de contrôle de mobilité du gaz dans la récupération du pétrole. Ainsi, un modèle fiable et prédictif des écoulements de mousse en milieu poreux est nécessaire pour le développement d'un gisement pétrolier sur la base de ce procédé.

Il est important avant tout de bien définir le mélange de fluides que constitue la mousse, de détailler ses principales caractéristiques lors de son écoulement dans les milieux poreux et d'identifier les principaux mécanismes et paramètres influençant son comportement.

### 1.1 Définition de la mousse

Hors milieu poreux, la mousse est définie comme une dispersion d'un grand volume de gaz dans un petit volume de liquide. Les bulles de gaz sont séparées par des films de liquide très fins de l'ordre de 10-100 nm, appelés lamelles. Les lamelles se rencontrent pour former une jonction de liquide plus épaisse, dénommée bordure de Plateau (cf. Figure 1.1 (a) et (b)). Ces bordures de Plateau et ces lamelles forment un réseau continu pour la phase liquide.

Cette dispersion est instable et se désagrège rapidement pour des raisons essentiellement thermodynamiques : l'état de l'énergie libre la plus basse est l'état correspondant à une aire minimale des interfaces liquide/gaz, c'est-à-dire effondrement des bulles pour former une interface plane séparant les deux phases. Les processus déstabilisants d'une lamelle sont multiples dont deux sont prédominants : la coalescence des bulles par succion capillaire et la diffusion du gaz de la petite bulle vers la plus grosse. Ces notions sont présentées en détail en section 1.3.2.2.

L'ajout de tensioactifs permet de stabiliser les lamelles. Un tensioactif est une molécule constituée de deux parties : une tête hydrophile (ayant une affinité pour l'eau) et une queue hydrophobe (n'ayant pas d'affinité pour l'eau). La partie hydrophile peut être chargée ou pas selon ses caractéristiques chimiques. Les tensioactifs peuvent être de différents types en fonction de la polarité de la tête hydrophile : anionique, cationique, amphotère et non ionique. Les deux parties d'une molécule de tensioactif se fixent de part et d'autre des interfaces de liquide et se repoussent, assurant ainsi la stabilité des lamelles (cf. Figure 1.1 (c)). Le type du tensioactif à utiliser est généralement choisi en fonction de plusieurs considérations à savoir la solubilité du tensioactif dans l'huile, la stabilité à la température et à la pression du réservoir, la capacité moussante du tensioactif définie comme la quantité de mousse formée par unité de volume de solution, l'adsorption du tensioactif à la surface de la roche, etc. Ainsi, le gaz, le liquide et le tensioactif sont les trois éléments clés de la formation d'une mousse.

Pour les applications pétrolières, différents gaz peuvent être utilisés dans les solutions moussantes notamment le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{N}_2$ , le gaz naturel ou encore la vapeur d'eau.

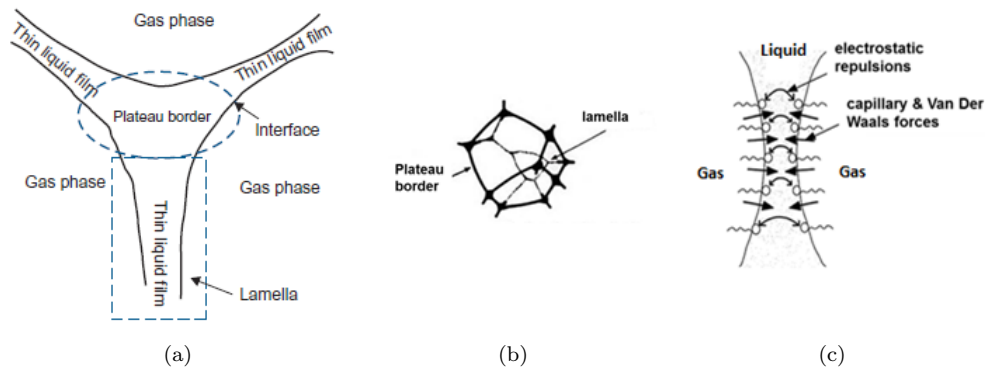


FIGURE 1.1 – (a) Schéma d'une mousse, (b) lamelle et bordure de Plateau, et (c) rôle des tensioactifs dans la stabilisation d'une lamelle.

Une fois injectée dans un milieu poreux, la mousse se présente généralement comme une succession de lamelles reliées entre elles par des films mouillant les parois. La taille des bulles de gaz dans un milieu poreux serait au moins aussi grande que celle des pores, voire bien supérieure. Ces conclusions sont issues d'observations des tailles de bulles à la sortie d'une carotte au laboratoire [17]. Cela a été expliqué par le phénomène de diffusion qui peut éliminer rapidement les bulles de gaz de taille plus petite que celle des pores. Par conséquent, la distance entre deux lamelles de liquide adjacentes est au moins supérieure à la longueur du pore considéré. On distingue généralement deux états de mousse en milieu poreux [18] :

- À phase gaz continue : pour laquelle il existe au moins un passage continu de gaz non interrompu par la présence des films de liquide. Les lamelles de liquide sont ainsi immobiles et bloquent l'écoulement du gaz uniquement dans des portions du milieu poreux. Dans ce cas, la mousse est appelée une mousse faible (cf. Figure 1.2 (b)).

- À phase gaz discontinue : pour laquelle il n'existe pas de chemin continu pour le gaz à grande distance en raison de la présence de films liquides dans tout le réseau poreux. Ainsi, l'écoulement du gaz ne peut avoir lieu à moins que les lamelles avancent dans le réseau poreux et franchissent les seuils entre pores, ce qui suppose que le gradient de pression excède une valeur-seuil. Dans ce cas, la mousse est dite mousse forte où les bulles de gaz présentes in-situ sont très petites et nombreuses (cf. Figure 1.2 (c)).

La transition entre une mousse faible et une mousse forte est appelée génération de mousse et est obtenue si le gradient de pression excède un seuil minimal de génération, auquel correspond un seuil de vitesse totale [19, 20, 21, 22]. Le comportement de la mousse en terme de rhéologie diffère entre les deux états puisque les mécanismes de transport des bulles de gaz semblent être très distincts. Cette distinction fait apparaître deux notions cruciales pour la caractérisation de l'écoulement des mousses : (1) **la texture** de la mousse qui est définie comme le nombre de lamelles par unité de volume de gaz et qui est donc inversement proportionnelle à la taille des bulles, et (2) **la qualité** de la mousse qui est définie comme la fraction volumique du gaz dans la mousse, qui est égale au rapport entre la vitesse de filtration du gaz et la vitesse de filtration totale (du gaz et du liquide constitutifs de la mousse).

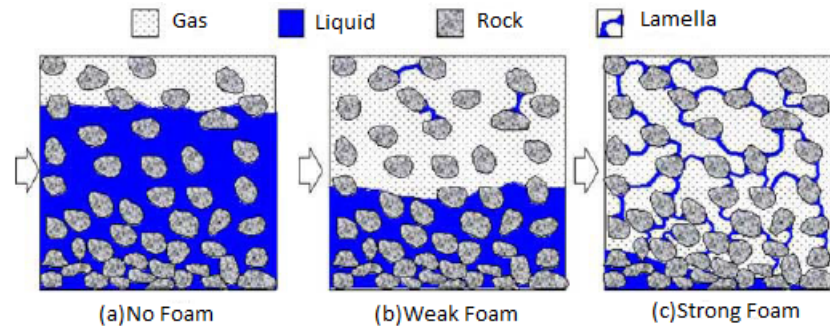


FIGURE 1.2 – États de la mousse dans un milieu poreux : (a) en l'absence de mousse (b) phase gaz continue (mousse faible), et (c) phase gaz discontinue (mousse forte) [23].

## 1.2 Comportement rhéologique de la mousse

### 1.2.1 La mousse réduit la mobilité du gaz

Il est généralement admis que la présence de mousse ne modifie pas directement la mobilité de l'eau [24, 25, 26]. En revanche, la mobilité du gaz est considérablement réduite en présence des films de liquide d'un facteur de 10 à 10 000 [11] : cela constitue l'effet principal de la mousse en milieu poreux. Dans notre cadre habituel d'écoulement Darcéen, cette réduction de mobilité du gaz peut être considérée comme une réduction de la perméabilité relative, ou une augmentation de la viscosité effective du gaz en présence de mousse, ou encore la combinaison des deux mécanismes. Tout au long de ce manuscrit, la mobilité de la mousse désigne la mobilité

du gaz en présence de mousse.

La réduction de mobilité du gaz moussant n'a lieu que lorsque des conditions d'existence de la mousse en milieu poreux sont satisfaites. En effet, pour une mousse forte (déjà formée), ces conditions font intervenir essentiellement une pression capillaire limite  $P_c^*$ . Khatib *et al* (1988) [27] ont en effet montré l'existence d'une valeur limite de pression capillaire au-delà de laquelle la mousse disparaît.

### 1.2.2 Facteurs influençant la mobilité du gaz

De nombreuses expériences en laboratoire et études théoriques ont montré que la mobilité de la mousse n'est pas uniquement fonction de la saturation comme dans le cas d'un fluide Newtonien, mais varie également en fonction d'autres paramètres tels que la texture de la mousse, les vitesses des deux fluides, la perméabilité et la porosité du milieu poreux, la concentration en tensioactif et son type, la salinité, la saturation en huile, etc. Ces effets sont les suivants.

**Effet de la texture :** plus la texture de la mousse est fine, plus le nombre de lamelles à mobiliser est important, et par conséquent, la résistance à l'écoulement des bulles de gaz augmente. La texture est le paramètre principal dans la détermination de la mobilité du gaz sous forme de mousse. Des relations de dépendance entre la mobilité du gaz et la texture ont été établies sur la base des études théoriques de l'écoulement de train de lamelles dans des capillaires qui présentent, ou pas selon la complexité de l'étude, des restrictions [10, 11, 28, 29]. Tous ces travaux montrent que la viscosité du gaz est proportionnelle à la texture, et en même temps, qu'elle dépend aussi d'autres paramètres influents. Il faut garder à l'esprit que la texture n'est pas un paramètre constant lors de l'écoulement de la mousse : elle résulte de plusieurs phénomènes de génération et de destruction qui se produisent à l'échelle des pores et qui sont eux-mêmes fonctions de plusieurs paramètres. Ceci rend la modélisation de la texture plus ou moins difficile et nécessite l'usage de lois de population microscopiques. Ces phénomènes au niveau des pores seront présentés en détail dans la section 1.3.2.

**Effet des vitesses :** les effets des vitesses d'eau et de gaz sur le comportement de la mousse peuvent être étudiés à l'aide du diagramme présenté d'abord par Osterloh et Jante (1992) [30], et ensuite, par Alvarez *et al* (2001) [1] et qui a été obtenu suite à des mesures expérimentales (cf. Figure 1.3 (a)). Ce diagramme met en évidence l'existence de deux régimes pour une mousse déjà formée : (1) un régime faible qualité pour lequel les gradients de pression stabilisés\* sont presque indépendants de la vitesse de l'eau, et (2) un régime haute qualité où les gradients de pression ne changent pas avec la vitesse du gaz. Notons que les deux régimes sont régis par des mécanismes différents : l'écoulement de la mousse dans le régime faible qualité est contrôlé par la génération et la mobilisation des lamelles, alors que le régime haute qualité est marqué par la destruction

---

\*. Les gradients de pression  $\nabla P$  sont donnés par  $\nabla P = \frac{\Delta P}{L}$ , où  $\Delta P$  désigne la différence de pression aux bornes du massif poreux et  $L$  sa longueur

et la coalescence des bulles puisque les films de liquide dans ce régime deviennent instables. Comme toute ligne droite tirée de l'origine de ce diagramme représente une qualité de mousse fixe, on peut distinguer une valeur de qualité spécifique, appelée qualité de mousse optimale, qui divise le domaine en deux parties et fournit le gradient de pression maximal pour une vitesse totale d'écoulement quelconque. Il est possible aussi de distinguer ces deux régimes de mousse en traçant l'évolution du gradient de pression  $\nabla P$  pour une série de déplacements à vitesse totale fixée d'une mousse de qualité variable. En particulier, en considérant la mousse comme une seule phase homogène dans le milieu poreux, il est possible de lui attribuer une viscosité apparente  $\mu_f^{\text{app}}$  calculée à partir de la loi de Darcy monophasique comme  $\mu_f^{\text{app}} = \frac{k}{u} |\nabla P|$ , où  $k$  désigne la perméabilité du milieu poreux et  $u$  la vitesse totale d'écoulement. Au régime faible qualité, la viscosité apparente augmente avec la qualité jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une qualité dite optimale. Pour les qualités supérieures, la viscosité apparente diminue et atteste de la rupture des lamelles, marquant ainsi le régime haute qualité (cf. Figure 1.3 (b)).

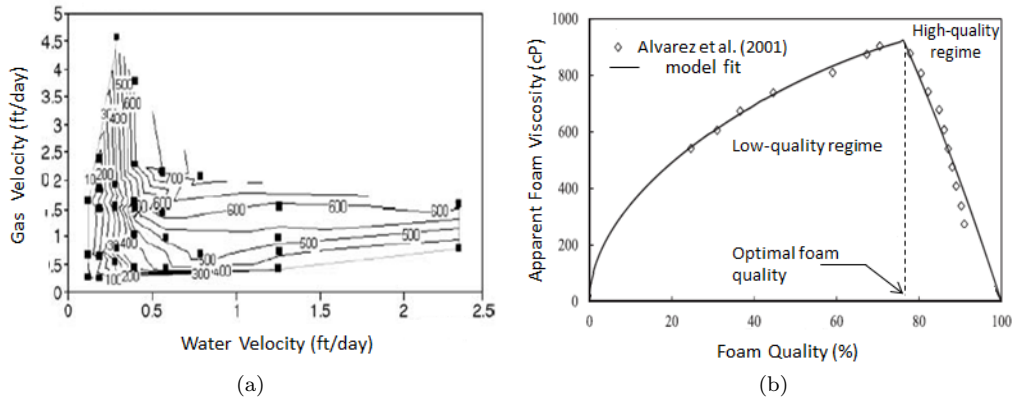


FIGURE 1.3 – Effets des vitesses : (a) contours iso-gradients de pression mesurés en régime permanent en fonction des vitesses de filtration d'eau et de gaz : les contours verticaux dans la partie supérieure-gauche désignent le régime haute qualité et les contours dans la partie inférieure-droite indiquent le régime faible qualité (adaptée de Alvarez *et al* (2001) [1]), et (b) viscosité apparente de la mousse pour des qualités variables de la mousse en déplacement à vitesse totale fixée (adaptée de Lotfollahi *et al* (2016) [31]).

Par ailleurs, la vitesse du gaz induit un comportement rhéo-fluidifiant de la mousse pour une texture donnée (mise en évidence le plus souvent en régime faible qualité où la texture est maintenue à sa valeur maximale). Autrement dit, la mobilité de la phase gazeuse d'une mousse de texture donnée augmente avec la vitesse d'écoulement. Cette dépendance a été mise en évidence par les études microscopiques de l'écoulement de la mousse dans des capillaires [32, 10]. Ces travaux prédisent que la viscosité effective du gaz varie en puissance  $-1/3$  de la vitesse du gaz. Ce coefficient a été retrouvé par Falls *et al* (1989) [28] suite à des mesures sur un micro-modèle de billes de verre et par Ettinger et Radke (1992) [17] en utilisant des grès de Berea. Par contre, il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur la valeur exacte de ce coefficient rhéo-fluidifiant en raison de la complexité du transport des lamelles dans des milieux poreux

naturels, plus complexes que des capillaires de géométries simples. La rugosité, la sinuosité, les restrictions/élargissements et la connectivité des pores négligés peuvent être à l'origine d'une telle différence. Les équations d'écoulement de lamelles dans des capillaires seront présentées en détail dans le chapitre 2.

**Effet de la concentration en tensioactif :** la concentration en tensioactif affecte la performance de la mousse en milieu poreux. En effet, ce paramètre contrôle la stabilité des films de liquide et donc la durée de vie de la mousse. Il a été montré que la mobilité de la mousse diminue lorsque la concentration en tensioactif augmente pour la même formulation [33, 34, 35, 36, 27]. Cette dépendance est due à la stabilité des lamelles qui croît avec la concentration en tensioactif. Il est souvent souhaitable de rechercher une réduction de mobilité convenable obtenue avec une faible concentration en tensioactif pour des raisons évidentes de coût.

**Effet de la perméabilité :** les expériences de Moradi-Araghi *et al* (1997) [33] et Alvarez *et al* (2001) [1] ont montré que la perméabilité a un effet significatif sur la performance de la mousse. En particulier, la viscosité apparente de la mousse augmente avec la perméabilité pour les mêmes conditions d'injection (qualité et vitesse totale), ce qu'atteste une réduction de mobilité du gaz plus importante dans les carottes de grande perméabilité. Toutefois, la dépendance de la qualité de mousse optimale à la perméabilité reste ambiguë voire même contradictoire entre certaines études. D'une part, les mesures de Moradi-Araghi *et al* (1997), exploitées plus tard par Farajzadeh *et al* (2015) [34], montrent que la qualité optimale diminue lorsque la perméabilité du milieu poreux augmente comme représenté sur la figure 1.4 (a). Notons toutefois que, vu le faible nombre de mesures expérimentales de la qualité optimale, cette conclusion reste à confirmer avec d'autres expériences tout en sachant également la difficulté à réaliser des mesures dans la zone de transition entre le régime faible et haute qualité. D'autre part, les conclusions d'Alvarez *et al* (2001) [1] indiquent qu'une augmentation de la perméabilité augmentera la qualité de transition, comme le résume la représentation schématique en Figure 1.4 (b). Cela a été traduit par un déplacement vers le haut des lignes horizontales d'iso-gradient de pression  $\nabla P$  suite à une croissance de la perméabilité. En effet, la facilité avec laquelle une lamelle peut être transportée en régime faible qualité dépend de la taille des pores et de leurs seuils, et donc de la perméabilité. En raison de la dimension des pores plus élevée, une résistance capillaire inférieure est attendue dans un milieu poreux de forte perméabilité, générant ainsi un gradient de pression plus faible que celui obtenu avec une faible perméabilité. Par contre, la perméabilité semble avoir peu d'impact sur le gradient de pression d'un écoulement de mousse de haute qualité.

Comme la qualité optimale représente une qualité de transition du régime de transport des lamelles à un régime de coalescence des bulles, l'effet de la perméabilité sur ce paramètre est souvent considéré, à des fins de modélisation, comme un effet sur la rupture des films de liquide. Pour cela, plusieurs auteurs ont étudié la dépendance de la stabilité des lamelles à la perméabilité [27, 37].

Pour conclure, la perméabilité impacte la performance de la mousse de manière différenciée,



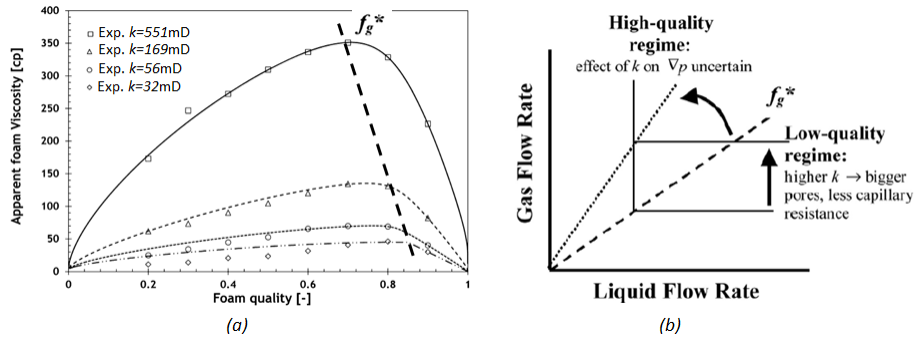


FIGURE 1.4 – Effet de la perméabilité : (a) viscosité apparente de la mousse en fonction de la qualité et de la perméabilité. Les données expérimentales (représentées en symboles) de Moradi-Araghi *et al* (1997) [33] ont été ajustées par Farajzadeh *et al* (2015) [34] en utilisant un modèle de mousse (tracé en lignes). Les résultats montrent que la qualité optimale diminue avec l’augmentation de la perméabilité à vitesse totale constante (guide visuel en trait discontinu) ; (b) le changement de la qualité optimale avec une perméabilité croissante comme décrite par Alvarez *et al* (2001) [1]. L’effet principal de la perméabilité est le déplacement vers le haut des iso-gradients horizontaux, ce qui signifie que la qualité optimale est une fonction croissante de la perméabilité.

ce qui contribue à l’uniformisation du front de déplacement entre couches de perméabilité différente. Ces effets sont considérables à l’échelle d’un pilote qui explore le plus souvent des niveaux de perméabilité contrastée et dans lequel une diversion du gaz est généralement observée entre les couches. Certains travaux de la littérature ont proposé des lois d’échelle liées à la perméabilité [34, 27, 38], mais ils demeurent peu concluants et doivent encore être approfondis.

**Effet de l’huile :** les interactions mousse/huile sont d’une importance cruciale pour les applications de la mousse dans le contexte de la récupération assistée du pétrole. Hélas, il a été montré que l’huile représente un agent anti-moussant menant à la destruction des films de liquide constitutifs d’une mousse [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]. En particulier, des travaux expérimentaux montrent que la mousse ne peut pas être générée lorsque la saturation en huile dans la carotte dépasse une certaine valeur critique [47, 48, 49]. Les mécanismes de déstabilisation d’une mousse par une huile sont divers et comprennent essentiellement (1) la perte de concentration en tensioactif moussant sur les interfaces gaz/liquide au profit de la phase huile, (2) l’étalement des gouttelettes d’huile sur les films de liquide entraînant leur destruction et (3) l’occupation par l’huile résiduelle des pores dans lesquels des lamelles pourraient être générées. Toutefois, les mécanismes qui interviennent dans les interactions entre l’huile et les films de liquide sont beaucoup plus complexes et demeurent mal compris.

Récemment, Farzaneh et Sohrabi (2015) [46] ont décrit qualitativement l’effet de l’huile sur la stabilité de la mousse dans une colonne. Les observations expérimentales obtenues sont illustrées par la figure 1.5. Certes, ces observations sont loin d’être plausibles dans le cas d’un milieu poreux naturel, mais elles peuvent élucider les points en question et mettre en évidence

la caractère préjudiciable de l'huile à la présence de la mousse. Toutefois, certains travaux [50, 51, 52] ont montré que des films de liquide chargés d'huile peuvent exister et résister à la rupture catastrophique. En effet, l'interaction entre la mousse et l'huile dépend essentiellement de la physico-chimie du système de fluide utilisé.

Les effets de l'huile sur la stabilité de la mousse ne sont pas notre première préoccupation dans cette thèse, qui est consacrée aux spécificités de l'écoulement de mousse en milieu poreux, donc en l'absence de facteurs préjudiciables à sa stabilité tels que la présence d'huile.

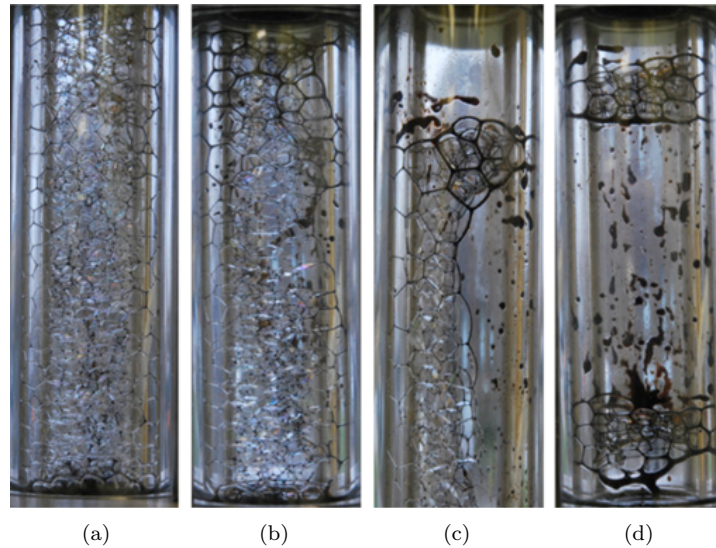


FIGURE 1.5 – Action de 10 % d'huile sur la stabilité des films de liquide dans une colonne de mousse à : (a)  $t=0$  min, (b)  $t=5$  min, (c)  $t=10$  min et (d)  $t=16$  min, selon Farzaneh et Sohrabi (2015) [46].

### 1.3 Mécanismes de la réduction de mobilité du gaz

La réduction de mobilité du gaz en présence de mousse dans les milieux poreux est due essentiellement à deux mécanismes : le piégeage du gaz et le transport des lamelles qui fait intervenir des mécanismes de génération et de destruction de lamelles.

#### 1.3.1 Piégeage de la mousse

Le piégeage de la mousse, dans des portions du milieu poreux, bloque l'écoulement du gaz par diminution de la section utile d'écoulement du gaz, ce qui engendre une résistance accrue au transport de cette phase. En effet, seule une fraction (continue et/ou discontinue) du gaz sous forme de mousse est en mouvement alors que l'autre est piégée/immobile (cf. Figure 1.6). Ce

---

mécanisme qui impacte fortement la mobilité de la mousse, est souvent décrit par une réduction de la perméabilité relative du gaz par la plupart des auteurs [11, 12, 53].

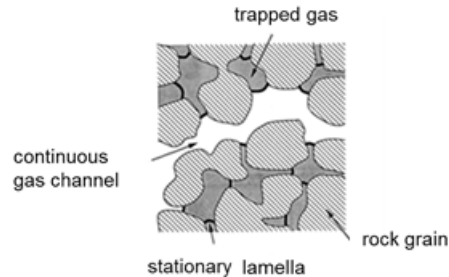


FIGURE 1.6 – Configuration d’une mousse à gaz continu en milieu poreux. Les grains de la roche sont hachurés ; le gaz piégé est représenté en gris et les lamelles immobiles en lignes noires épaisses ; le gaz continu est indiqué en blanc non hachuré [12].

Des études de traçage du gaz montrent que la proportion de gaz piégé dans une mousse en régime permanent dans les grès peut atteindre des valeurs assez grandes. Friedmann *et al* (1991) [26] ont utilisé des grès de Berea et une qualité d’injection de 95 %. Ils ont trouvé des fractions piégées d’environ 85 %, avec une légère augmentation de cette fraction avec la vitesse du gaz. Par ailleurs, Radke et Gillis (1990) [54] ont trouvé des fractions de gaz piégé entre 80 et 100 % selon les conditions d’injection en terme de vitesses des deux phases gaz et liquide. Nguyen *et al* (2002) [55] ont utilisé un micro-modèle pour évaluer au moyen d’un traceur la fraction de gaz piégée dans un écoulement de mousse. Ils ont observé que la diffusion du traceur impacte la mesure de gaz piégé, et que la distribution des zones de piégeage du gaz change de manière périodique au cours de l’écoulement. Pour permettre la mesure du gaz piégé, du gaz pur est injecté après un certain temps, et la fraction piégée est mesurée à partir du volume de mousse restant après son passage. Une fraction piégée de l’ordre de 65 % a été mesurée pour les différentes vitesses d’injection. Plus récemment, Nguyen *et al* (2009) [56] ont utilisé la tomographie à rayons X avec des traceurs de xénon pour fournir une estimation de la fraction piégée. Ils ont constaté que la fraction piégée diminue avec l’augmentation de la vitesse du gaz, et augmenterait faiblement avec le taux d’injection de liquide. Les valeurs mesurées de la fraction piégée sont comprises entre 0.47 et 0.6. Des images par scanner de la concentration du traceur sont présentées en Figure 1.7.

### 1.3.2 Transport des lamelles

Les bulles de gaz mobile subissent une traînée significative en raison de leurs interactions avec la structure poreuse (parois des pores et restrictions) et aussi des réarrangements des lamelles par forces visqueuses et capillaires [10, 28, 11]. En effet, pour que les bulles de gaz circulent, les lamelles doivent être forcées à travers le réseau des pores, entraînant ainsi une augmentation du gradient de pression appliqué et par conséquent de la viscosité effective du gaz.

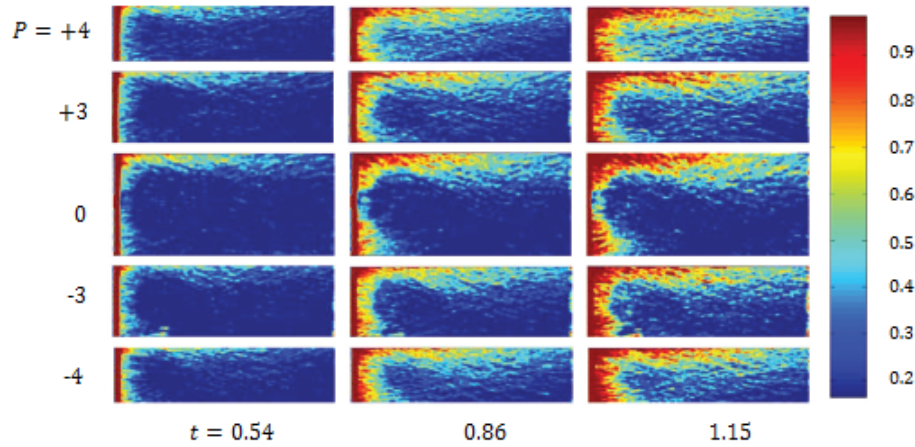


FIGURE 1.7 – Images axiales par tomographie à rayons X des déplacements de traceur Xe d’une mousse en régime permanent en fonction du temps d’injection adimensionnel (équivalent au volume de pore injecté). La valeur de  $P$  représente la coupe axiale par rapport à la tranche centrale  $P = 0$  (9 coupes axiales au totale). La barre de couleurs à droite indique la fraction molaire Xe dans la phase gazeuse, normalisée par la valeur injectée. La fraction mobile est visible en haut de la section, avec une concentration de traceur importante à la sortie de la carotte pour  $t = 1.15$  (adaptée de Nguyen *et al* (2009) [56]).

En milieu poreux, la mousse se propage en se formant et en se détruisant : des lamelles de liquide apparaissent alors que d’autres disparaissent. Ces événements au niveau des pores contrôlent, en premier lieu, l’évolution de la texture de la mousse dans le milieu poreux et ainsi la viscosité du gaz qui en résulte.

### 1.3.2.1 Génération de la mousse

Les mécanismes responsables de la génération des lamelles dans le milieu poreux sont nombreux ; dans cette partie nous présentons les trois mécanismes principaux.

**Snap-off.** Ce mécanisme a été mis en évidence par Roof (1970) [57] alors qu’il étudiait le piégeage de l’huile dans des milieux poreux mouillables à l’eau. Durant l’écoulement du gaz et à la rencontre d’une restriction, la bulle de gaz filtre en partie, se casse, et donne naissance à une nouvelle bulle. En effet, après passage de la restriction, le rayon de la bulle du gaz devient plus grand, ce qui entraîne une diminution de la pression capillaire, et donc un écoulement de retour du liquide vers la restriction. Ce qui fait, un amincissement et un ”claquage” du film de gaz se produisent au niveau de la restriction, faisant apparaître ainsi une nouvelle bulle de gaz, comme illustré par la figure 1.8.

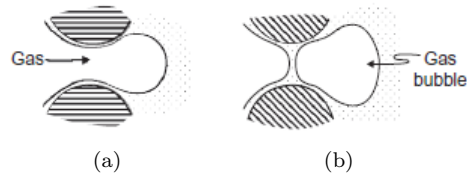


FIGURE 1.8 – Schéma du mécanisme de snap-off : (a) le gaz pénètre dans la restriction, et (b) l'accumulation du liquide dans la restriction et apparition d'une nouvelle bulle de gaz [58].

**Division de lamelle.** Lorsqu'une bulle de gaz arrive à un embranchement (les grains du milieu poreux), elle se divise en deux bulles (cf. Figure 1.9) ce qui contribue à l'augmentation de la texture de la mousse.

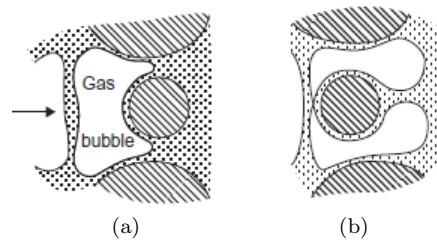


FIGURE 1.9 – Division de lamelle : (a) la bulle de gaz rencontre un embranchement, et (b) la division de la bulle en deux [58].

**Leave-behind.** Ce mécanisme intervient au cours du déplacement d'une solution tensio-active par du gaz : lorsque deux interfaces liquide/gaz se rapprochent, elles forment un film de liquide (lamelle) parallèle à la direction de l'écoulement du gaz, comme cela est illustré sur la figure 1.10. Ce mécanisme est important pour des faibles vitesses de gaz [16].

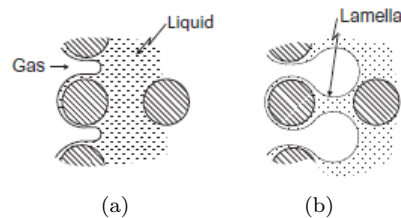


FIGURE 1.10 – Mécanisme de leave-behind : (a) entrée massive du gaz et déplacement de la solution tensio-active, et (b) rapprochement des ménisques et formation d'une lamelle [58].

### 1.3.2.2 Destruction de la mousse

Les mécanismes de génération de lamelles en milieu poreux sont contrebalancés par des processus de destruction. Chambers et Radke (1991) [59] ont montré que deux mécanismes sont essentiellement responsables de la destruction des lamelles : la succion capillaire et la diffusion du gaz.

**Succion capillaire.** La succion capillaire est toujours considérée comme étant le principal mécanisme responsable de la rupture des lamelles en milieu poreux. Le saut de pression  $P_c$  dans la direction normale à la surface qui sépare les deux phases gaz/liquide s'écrit d'après la loi de Laplace comme  $P_c = P_g - P_l = 2C_m\sigma$ , où  $C_m$  désigne la courbure moyenne de l'interface ( $2C_m$  correspond à la somme des inverses des deux rayons principaux de courbure),  $P_g$ ,  $P_l$ , et  $P_c$  désignent respectivement la pression du gaz, du liquide et la pression capillaire, et  $\sigma$  la tension interfaciale entre le gaz et le liquide. Le mode d'action de la pression capillaire sur la stabilité de la lamelle peut être analysé selon l'état statique ou dynamique de la lamelle.

Lamelle statique : on peut en première approximation considérer que les lamelles immobiles sont planes en raison de leur faible épaisseur et de leur direction (souvent orientées à  $90^\circ$  par rapport aux parois des pores). La figure 1.11 (a) représente schématiquement comment des tensioactifs anioniques peuvent peupler une interface gaz/liquide. On observe que la pression capillaire  $P_c^L$  au niveau du film plan est nulle, alors que celle  $P_c^{PB}$  au niveau de la bordure de Plateau incurvée n'est pas nulle. Compte tenu de la continuité de pression dans le gaz, il existe une différence de pression du liquide entre la lamelle et la bordure de plateau, qui est responsable du drainage, ou succion capillaire, de la lamelle.

La stabilité des lamelles (c'est-à-dire leur capacité à résister au drainage complet du liquide) est assurée par la présence d'une pression supplémentaire dans le liquide, dite pression de disjonction  $\Pi$ , qui existe grâce à la finesse des films de liquide et qui englobe, par ailleurs, les forces structurales s'exerçant entre les molécules. Cette pression supplémentaire, fonction unique de l'épaisseur du film  $\Pi(h)$ , comme cela est indiqué en Figure 1.11 (b), est la somme de trois contributions : la répulsion électrostatique  $\Pi_{el}$ , l'attraction de van der Waals  $\Pi_{vw}$ , et les forces stériques/d'hydratation  $\Pi_{s-h}$ . Les composantes répulsive de  $\Pi(h)$ , qui résultent de la présence de tensioactifs, assurent la stabilité des lamelles. La résultante de ces forces appliquées sur la surface des films équivaut ainsi à une pression positive  $\Pi$ , qui équilibre la pression capillaire qui s'exerce au sein du milieu poreux. En effet, l'épaisseur de la lamelle  $h$  s'ajuste de telle sorte que la pression de disjonction au sein de la lamelle équilibre la pression capillaire imposée par le milieu poreux telle que  $\Pi(h) = P_c$ .

Les deux lignes interrompues de la figure 1.11 (b) correspondent à deux éventuelles valeurs de la pression capillaire imposée par un milieu poreux. Pour une pression capillaire  $P_{c1}$ , qui est inférieure à  $\Pi_{max}$ , la pression de disjonction  $\Pi$  peut donner lieu à trois épaisseurs de film différentes. Toutefois, Vrij (1966) [60] indique à travers une analyse thermodynamique de stabilité par perturbations infinitésimales, que seules les lamelles dont l'épaisseur décroît lorsque leur

pression de disjonction augmente (i.e.  $\frac{d\Pi}{dh} < 0$ ) sont stables. Ainsi, deux types de films stables peuvent être identifiés sur la courbe  $\Pi(h)$  :

- des films extrêmement minces (Newton Black Films, NBF) : pour ces épaisseurs de film, les forces stériques/d’hydratation dominent la pression de disjonction. Il est peu probable que ces films soient assez robustes pour être stables en milieu confiné. Pour cette raison, l’existence de films NBF est considérée non plausible dans le cas de la mousse en milieu poreux [37, 59].
- les films les plus rencontrés (Common Black Films, CBF) : ces films ont une plus grande épaisseur, telle que la répulsion électrostatique domine l’ensemble des forces structurales.

En conséquence, seules les lamelles d’épaisseur supérieure à l’épaisseur critique  $h_c$ , pour laquelle  $\Pi_{\max}$  est atteinte, sont stables. Par contre, une pression capillaire  $P_{c2}$  supérieure à  $\Pi_{\max}$  déstabilise les lamelles : la rupture des films est inévitable pour des fortes pressions capillaires [61, 59]. Notons que la valeur de  $\Pi_{\max}$  est déterminée uniquement par la formulation tensio-active. Nous concluons que, pour une lamelle statique, la pression capillaire imposée par le milieu poreux détermine la stabilité des lamelles.

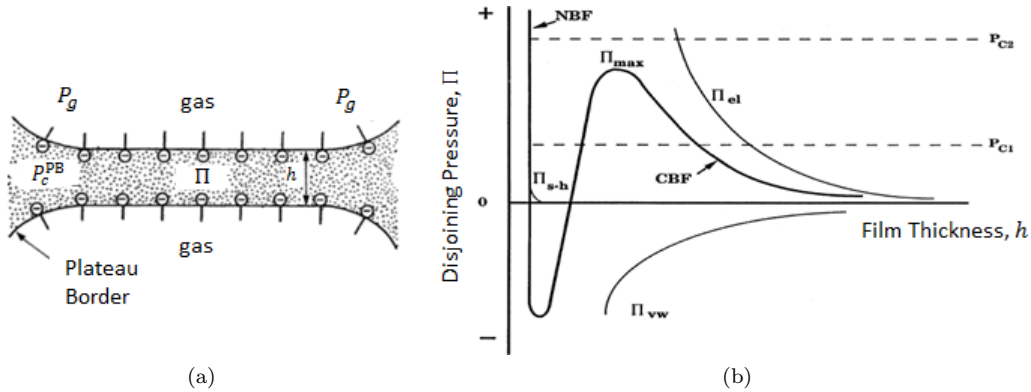


FIGURE 1.11 – (a) Mise en évidence de la pression de disjonction dans le liquide d’une lamelle plate et (b) pression de disjonction en fonction de l’épaisseur du film de liquide [61].

Lamelle dynamique : dans le cas dynamique, la coalescence des lamelles est beaucoup plus compliquée que dans le cas statique. La figure 1.12 schématise le franchissement d’un seuil entre pores par une lamelle. Près de la restriction, la lamelle est épaisse alors qu’elle s’amincit au sein du pore en raison de la dilatation de la bulle. Au cours de cet amincissement, si le rapport d’aspect entre le rayon du pore  $R_b$  et le rayon de la restriction  $R_c$  est assez grand, l’épaisseur de la lamelle peut chuter en dessous de l’épaisseur critique  $h_c$  et entraîner sa rupture. Toutefois, si la vitesse du gaz est faible, une réalimentation en liquide de la lamelle par la pression de disjonction peut se produire et éviter sa rupture. À l’opposé, une vitesse élevée favorise la déstabilisation des lamelles.

La pression capillaire pour laquelle la lamelle en mouvement se rompt est appelée pression capillaire limite  $P_c^*$ . Cette pression limite est inférieure à  $\Pi_{\max}$ , l’écart variant en fonction des

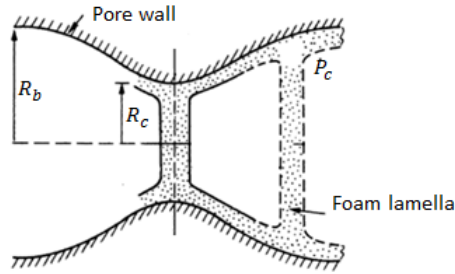


FIGURE 1.12 – Schéma de passage d’une lamelle d’une restriction à un pore sur une période de temps très faible. Le milieu poreux (assimilé ici par un capillaire périodiquement rétréci) impose la pression capillaire sur les bordures de Plateau (adaptée de Jiménez et Radke (1988) [37]).

influences respectives des mécanismes d’étirement et de succion capillaire.  $P_c^*$  dépend fortement du tensioactif, de sa concentration, de la perméabilité et la structure du milieu poreux (rapport d’aspect), et de la vitesse du gaz. En particulier, la valeur de  $P_c^*$  diminue lorsque la vitesse du gaz et/ou le rapport d’aspect  $\frac{R_b}{R_c}$  augmentent.

Les travaux de Khatib *et al* (1988) [27] représentent les premières mesures de la pression capillaire limite  $P_c^*$  lors de la destruction des lamelles dans des sables de très fortes perméabilités. Plus tard, Jiménez et Radke (1988) [37] ont proposé la théorie qui quantifie les divers mécanismes régissant la destruction d’une lamelle dynamique dans un capillaire périodiquement rétréci. Un bon accord a été conclu entre la théorie et l’expérience de Khatib *et al*.

**Diffusion du gaz.** La diffusion du gaz est le deuxième mécanisme responsable de la destruction de la mousse en milieu poreux et concerne principalement les bulles piégées. En effet, en raison de la différence de pression du gaz entre les bulles de différentes tailles (bulles de différentes courbures), le gaz se dissout dans les films de liquide et diffuse des bulles de petites tailles vers les bulles de grandes tailles selon le mûrissement d’Ostwald. Ainsi, les petites bulles ont tendance à disparaître au profit des grosses bulles. La texture de la mousse devient ainsi grossière.

Ce phénomène entraîne donc une augmentation de la taille des bulles piégées et favorise ainsi leur dépiégeage.

## 1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les mécanismes principaux d’écoulement de mousse en milieu poreux. La mobilité du gaz en milieu poreux est fortement réduite lorsqu’il s’écoule sous forme de mousse, alors que la mobilité du liquide reste inchangée. Cette réduction de mobilité du gaz est une fonction de plusieurs paramètres dont l’élément prépondérant est la texture de la mousse. Cette texture résulte de la compétition entre des mécanismes de génération et de destruction des bulles de gaz qui se produisent à l’échelle des pores. Ces mécanismes



---

dépendent eux-mêmes de la perméabilité du milieu poreux, la concentration en tensioactif et la vitesse du gaz. Dès lors, un modèle de mousse doit inclure soit une description explicite de ces mécanismes par des lois microscopiques qui vont déterminer la texture et par conséquent la mobilité du gaz, soit des fonctions empiriques qui représentent implicitement les effets généraux de la texture sur la mobilité du gaz. Ces lois ou fonctions peuvent être déduites à partir de données expérimentales de déplacement acquises sur des modèles simplifiés de milieu confiné (capillaires) ou sur des milieux poreux naturels.