

: Généralités sur les mousses

I.	Description multi-échelle de la mousse hors milieu poreux	10
	A. Définition de la mousse	10
	B. Structure de la mousse à différentes échelles	11
II.	Écoulement des mousses en milieux poreux (Aspects microscopiques)	13
	A. Définition de la mousse en milieu poreux	13
	B. Les méthodes d'injection	13
	C. Texture et qualité de la mousse	14
	D. Mécanismes de formation et de déstabilisation de la mousse	16
	1. Mécanismes de génération de la mousse	16
	a) Snap-off	16
	b) Division lamellaire	17
	c) Leave-behind	17
	d) Pinch-off	18
	2. Mécanismes de destruction de la mousse	19
	a) Equilibre entre pression capillaire et pression de disjonction	19
	b) Diffusion gazeuse à travers les films	21
	c) Effet de l'huile	21
III.	Écoulement des mousses en milieux poreux (Aspects macroscopiques)	23
	A. Comportements transitoire et stationnaire	23
	1. Le régime transitoire	23
	2. Les régimes d'écoulement stationnaire	26
	3. Le concept de « pression capillaire limite »	27
	B. Paramètres influençant l'écoulement de la mousse	28
	1. Effets d'injection des fluides	28
	2. Effets d'entrée	29
	3. Perméabilité de la roche	29
	4. Type de gaz	30
	5. Concentration de tensioactifs	31
IV.	Réduction de la mobilité du gaz par la mousse	32
	A. Viscosité effective du gaz	33
	B. Perméabilité relative du gaz	34
V.	Conclusion du premier chapitre	37

I. Description multi-échelle de la mousse hors milieu poreux

A. Définition de la mousse

La mousse liquide est un système colloïdal composé d'une phase liquide contenant des molécules de tensioactifs et d'une phase gazeuse. La phase liquide est continue tandis que la phase gazeuse est dispersée sous forme de bulles dans la phase liquide. La mousse d'apparence fragile, arrive à créer un grand ensemble d'interfaces liquides/gaz stabilisées par les tensioactifs (voir Figure 4 à gauche). Ceci confère à la mousse des propriétés physico-chimiques intéressantes utilisées dans des domaines industriels très variés (voir Figure 4 à droite) : produit détergent en cosmétique, fluides extincteurs pour les incendies ou agent isolant dans le traitement de surface, etc.



Figure 4 : Images de mousse *Bulk* (à gauche) et extinction d'incendie à l'aide de la mousse (à droite).

Le rapport entre le volume liquide contenu dans la mousse et le volume total de la mousse définit sa fraction liquide :

$$\phi_l = \frac{V_l}{V_{mousse}} = \frac{V_l}{V_l + V_g} \quad (\text{I.1})$$

Ce paramètre permet de mesurer l'humidité de la mousse, et sa variation influence la structure de la mousse à différentes échelles (Figure 5). Lorsque $\phi_l \geq \phi_l^*$, les bulles sont sphériques et ne se touchent pas, on parle alors de liquide bulleux ou émulsion gazeuse. Lorsque $0.05 \leq \phi_l < \phi_l^*$, les bulles sont au contact sous formes de sphères écrasées, on

parle alors de mousse humide. Quand ϕ_l est plus petite que 0.05, on est dans le cas d'une mousse sèche avec des bulles sous la forme de polyèdres. La transition entre le liquide bulleux et la mousse humide a lieu en ϕ_l^* , (proche de 0.3), qui correspond à peu-près à un empilement compact de sphères dures[11].

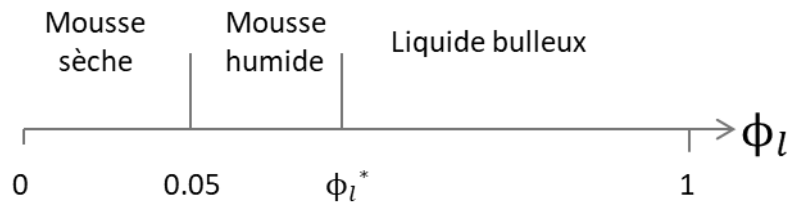


Figure 5 : Différents types de structure de la mousse en fonction de la fraction liquide.

B. Structure de la mousse à différentes échelles

La mousse est aussi un système métastable, qui évolue dans le temps et dans l'espace en fonction des contraintes physico-chimiques appliquées (température, pH, pesanteur, adhésion aux parois, etc.). Cette évolution affecte les éléments qui forment sa structure, qui s'étale sur plusieurs échelles du nanomètre au micromètre [12], voire au millimètre.

A l'échelle nanométrique on trouve les tensioactifs. Ce sont des molécules nécessaires pour stabiliser les films liquides (appelés aussi « lamelles ») entourant les bulles [13]. Les tensioactifs s'organisent souvent sous forme de monocouches avec la tête hydrophile dans la phase liquide et la queue hydrophobe dans la phase gazeuse. Les propriétés d'élasticité de surface et de viscosité des films liquides sont influencées par la nature, l'organisation et la concentration des tensioactifs.

A l'échelle micrométrique, la mousse est décrite par les « bords de Plateau » en référence au physicien et mathématicien belge Joseph Plateau (XIX^{ème} siècle). Il s'agit de canaux liquides épais se situant entre les bulles et formés par l'intersection de trois films liquides. Ils peuvent facilement être vus à l'œil-nu. Ces bords de Plateau se rejoignent quatre par quatre au sommet d'une bulle pour former un nœud ou un vertex (cf. Figure 6).

Les bulles quant à elles, s'étalent généralement de quelques centaines de micromètre à quelques millimètres.

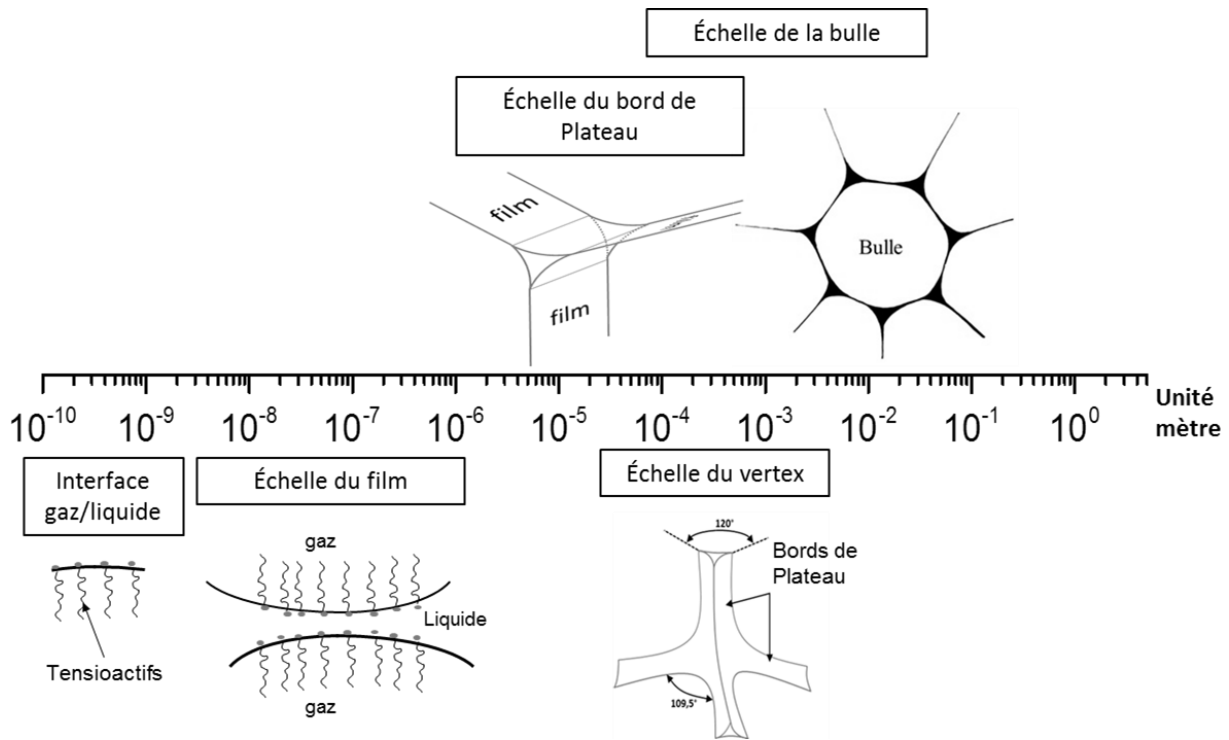


Figure 6 : Structure multi-échelle d'une mousse liquide et ordre de taille.

La structure statique de la mousse *Bulk* est totalement contrôlée par la minimisation d'énergie à travers la minimisation des aires interfaciales liquide/gaz. Néanmoins, il existe différents phénomènes physiques qui déstabilisent la mousse [14], à savoir :

- **Le murissement** : Diffusion du gaz à travers les films liquides par différence de pression de Laplace entre les bulles. Les petites bulles disparaissent au profit des grandes bulles.
- **Le drainage liquide** : Écoulement liquide des films vers les bords de Plateau à cause de la différence de courbure entre les deux. A l'échelle de la mousse le drainage liquide se fait via les bords de Plateau à cause de la gravité.
- **La succion capillaire** : Rupture du film liquide séparant deux bulles sous l'effet de la pression capillaire. Ce phénomène est responsable de la coalescence des mousses et est décrit en détails dans le cas des mousses en milieux poreux (cf. paragraphe (II.D.2)).

II. Écoulement des mousses en milieux poreux (Aspects microscopiques)

A. Définition de la mousse en milieu poreux

Dans un milieu poreux, une mousse est représentée schématiquement par une dispersion de phase gazeuse dans une phase liquide continue et stabilisée par des tensioactifs aux interfaces liquide/gaz. La phase gazeuse peut être totalement ou partiellement discontinue, la discontinuité étant assurée par des lamelles liquides [15] (cf. Figure 7). La phase liquide forme aussi des films de mouillage liquide sur les parois des grains, connectés aux lamelles. La mousse ne représente pas une phase en soi. Dans une mousse en milieu poreux, le liquide se divise en une fraction qui remplira les lamelles et les bords de Plateau et une fraction qui se logera dans les petits interstices du milieu poreux. Tandis que le gaz se divise en une fraction de gaz en écoulement et une autre fraction immobile, piégée dans le réseau poreux [16].

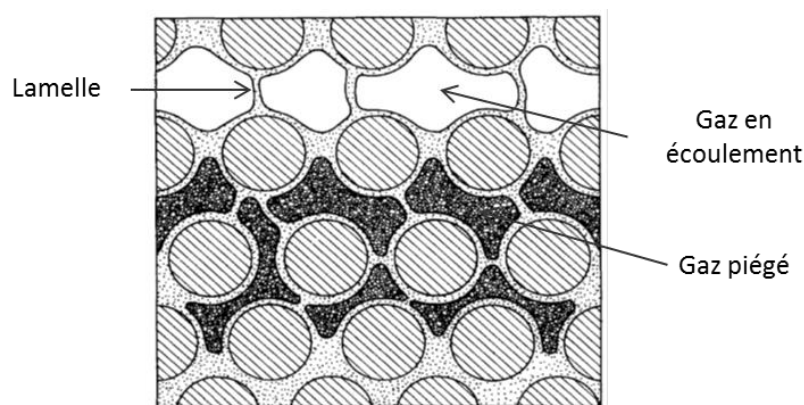


Figure 7 : Schéma de l'écoulement de la mousse à l'échelle du pore (modifié de [15]).

B. Les méthodes d'injection

Il existe différentes méthodes pour injecter ou former la mousse *in situ* dans un milieu poreux [7, 17, 18]:

- Co-injection de gaz et de liquide : la solution de tensioactifs et le gaz sont co-injectés à l'entrée du milieu poreux [6, 7].

- Pré-génération de la mousse : la mousse est générée à l'aide d'un générateur de mousse en dehors du milieu poreux avant de s'écouler dans le milieu poreux à balayer [19].
- Injection alternée de tensioactif et de gaz (*Surfactant Alternate Gas ou SAG*) [8]: le liquide contenant le tensioactif et le gaz sont injectés de manière alternée sous forme de bouchons « *Slugs* » et la mousse est alors générée *in situ* dans le milieu poreux. Durant le procédé SAG, la solution de tensioactifs est drainée par la phase gazeuse.

La pré-génération de la mousse permet de pallier principalement aux problèmes de puits faiblement productifs dans des réservoirs à faible pression, tandis que la co-injection et le procédé SAG seraient plus utiles pour améliorer l'efficacité du balayage [20].

C. Texture et qualité de la mousse

Le nombre de lamelles par unité de volume de gaz [21] définit la texture de la mousse n_f . Ce paramètre est d'une importance fondamentale car il est relié aux caractéristiques physiques intrinsèques à l'écoulement des mousses dans les milieux poreux, incluant la viscosité, la perméabilité relative et l'interaction entre les fluides. Hirasaki et al., [21] montre que le nombre de lamelles par unité de volume est inversement proportionnel à la taille moyenne des bulles qui s'écoulent dans un tube capillaire. D'autres auteurs utilisent cette notion de densité de lamelles pour décrire la texture de la mousse en relation notamment avec la viscosité du gaz moussant [22–24]. Certains auteurs se réfèrent à la distribution en taille des bulles pour parler de texture de la mousse en milieux poreux [25]. En l'absence de tensioactifs, une co-injection gaz-eau dans un milieu poreux aboutira nécessairement à des chemins préférentiels pour le gaz (généralement dans les canaux les plus larges) et le gaz aura tendance à migrer vers le haut par ségrégation gravitaire (cf. Figure 8.a). On appelle alors « mousse faible », une mousse qui développe généralement une faible différence de pression, avec une densité faible de lamelles et des bulles de grande taille (cf. Figure 8.b). A l'inverse, lorsqu'il existe un grand nombre de lamelles en l'absence de tout chemin de percolation de gaz, la mousse développe une grande résistance à l'écoulement du gaz et des bulles très fines sont présentes, on obtient alors ce qu'on appelle une « mousse forte » (cf. Figure 8.c). Les concepts de « mousse forte » et de « mousse faible » sont généralement qualitatifs et sont mieux appréciés à l'aide des mesures des différences de pressions lors de l'écoulement, en

comparaison avec des écoulements monophasique (liquide seul) ou diphasiques (gaz et eau sans tensioactifs).

Localement, la texture de la mousse est le résultat de la compétition de phénomènes complexes de création, de piégeage, de mobilisation et de destruction des lamelles. La plupart des études qui s'intéressent à la texture de la mousse dans un milieu poreux réel, mesurent la distribution ou la taille moyenne des bulles en sortie du milieu poreux dans des cellules de visualisation [25, 26]. La structure réelle de la mousse au sein du réseau poreux n'a jamais été observée. Ceci pose la question fondamentale de l'existence de la mousse sous forme de trains de bulles, qui est le modèle souvent mis en avant, et la possible existence d'une structure de mousse bulk au sein même du réseau poreux. Marsden et al., [25] affirment simplement que les bulles ont une distribution en taille du même ordre de grandeur que la distribution en taille des pores. D'autres auteurs confirment ces observations, même dans le cas de mousses faibles [24, 27].

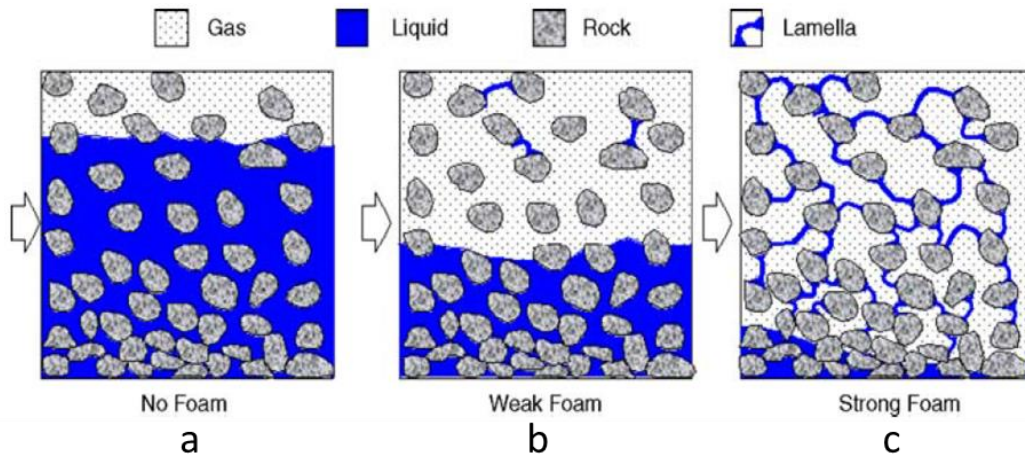


Figure 8 : Concept d'une mousse forte et faible en milieux poreux : (a) Écoulement diphasique gaz-eau (b) mousse faible (c) mousse forte ([23]).

La qualité de la mousse f_g est un autre paramètre très utilisée notamment pour décrire les écoulements de mousse en milieux poreux. La qualité de la mousse est définie comme le rapport du débit volumique de gaz par rapport au débit volumique total (liquide + gaz) :

$$f_g = \frac{Q_g}{Q_t} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (I.2)$$

Où Q_g , Q_l et Q_t représentent respectivement le débit volumique de gaz, le débit volumique de liquide et le débit volumique total.

La qualité de la mousse dans un milieu poreux peut aussi être décrite par les vitesses de Darcy (filtration) du gaz v_g et du liquide v_l , selon l'équation suivante [28] :

$$f_g = \frac{v_g}{v_t} = \frac{v_g}{v_g + v_l} \quad (\text{I.3})$$

Où v_t est la vitesse de Darcy (filtration) totale (du gaz et du liquide constitutifs de la mousse).

D. Mécanismes de formation et de déstabilisation de la mousse

A très petite échelle, la mousse en milieux poreux présente une dynamique particulière qui caractérise l'évolution de l'arrangement spatial de ses constituants : les bulles de gaz et la phase liquide (bords de Plateau et les lamelles). Différents auteurs se sont intéressés à décrire cette dynamique pour en tirer des mécanismes de formation et de destruction de la mousse lors de son écoulement. Dans le paragraphe qui suit, nous présentons les principaux mécanismes de génération et de destruction de la mousse en milieux poreux cités dans la littérature.

1. Mécanismes de génération de la mousse

Il existe principalement quatre mécanismes fondamentaux de formation de la mousse en milieux poreux [27]: le « *snap-off* », la division lamellaire, le « *leave-behind* » et le « *pinch-off* ».

a) Snap-off

Le Snap-off est un processus mécanique qui décrit la formation des bulles lorsque le gaz pousse une interface gaz/liquide à travers un seuil d'un pore (cf. Figure 9). Au moment où la bulle traverse le seuil, il se crée un gradient de pression capillaire; dans lequel la pression capillaire diminue en amont de la bulle pendant l'expansion de cette dernière à travers la constriction. Un apport de liquide se crée pour aboutir à la formation d'un col liquide au milieu du seuil de pore. En fonction du rapport de taille entre le rayon de courbure de la bulle et le rayon du seuil de pore, et en fonction de la géométrie des grains (plus ou moins pointus), le col liquide se transforme en lamelle ou pas. Généralement, le col liquide se forme dans des seuils exigus et y stagne [29]. Le Snap-off crée des bulles de gaz de tailles à peu-près

identiques à la taille des seuils de pores du milieu poreux et crée souvent un réseau de gaz discontinu abaissant la mobilité du gaz de plusieurs ordres de grandeurs. Ce mécanisme est reconnu comme étant le premier responsable de la formation des mousses fortes, et notamment dans le cas de co-injection gaz-tensioactifs [29] et de mousses relativement humides [30].

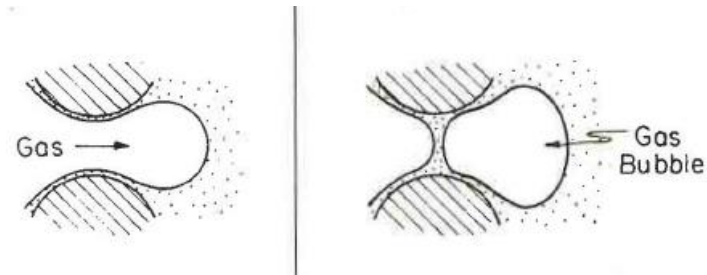


Figure 9 : Schéma du mécanisme de Snap-off [27].

b) Division lamellaire

La division lamellaire est le transport par division des lamelles ou des bulles. Ce mécanisme ne peut avoir lieu que si des bulles en mouvement préexistent. La division lamellaire se produit lorsqu'une bulle mobile se divise en deux parties ou plus à un point de branchement, comme illustrée sur la Figure 10. Comme le snap-off, la division lamellaire génère des mousses fortes. Il y a principalement deux prérequis pour ce mécanisme : un gradient de pression assez élevé pour mobiliser les multiples trains de bulles dans les branches et une taille de bulle plus grande que la taille du pore [31].

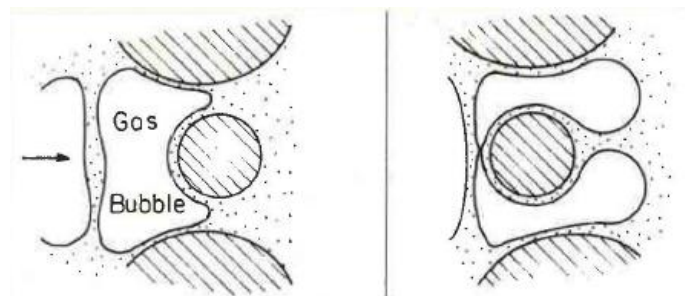


Figure 10: Schéma du mécanisme de division lamellaire [27].

c) Leave-behind

Ce mécanisme se produit lorsque le gaz envahit un milieu saturé en liquide. Lorsque deux ménisques de gaz arrivent sur un même pore rempli de liquide et y pénètrent en convergeant

par la suite, une lentille liquide stationnaire est formée et est laissée derrière (cf. Figure 11). Cette lentille se transforme en lamelle par la suite sous l'effet du drainage liquide [29]. Les mousses créées uniquement par *Leave-behind* sont considérées faibles ou inefficaces [32], car les lamelles sont parallèles à la direction d'écoulement de gaz, ce qui génère peu de résistance à l'écoulement [33]. Si ce mécanisme domine alors on obtient une phase gazeuse continue et une faible réduction de la mobilité du gaz [34][35].

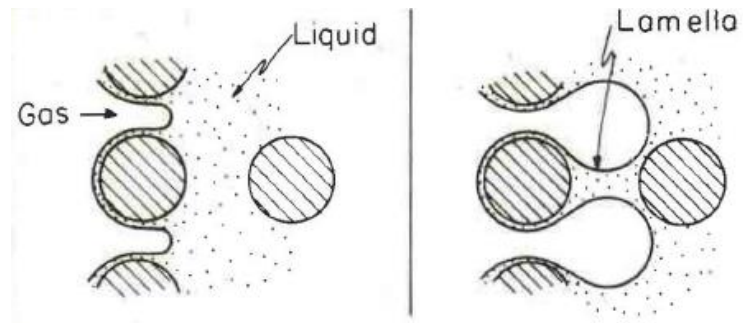


Figure 11: Schéma du mécanisme de Leave-behind [27].

d) Pinch-off

Récemment, Liontas et al., [30] ont découvert deux nouveaux mécanismes de génération de la mousse dans des canaux micro-fluidiques, appelés « Pinch-off » ou « pincement ». Ces mécanismes ont lieu lorsque deux bulles ou plus arrivent au niveau d'une constriction. Dans le cas d'un pincement entre une bulle et la paroi de la constriction le mécanisme se nomme « neighbor-wall pinch-off ». Dans le cas où une bulle est écrasée entre deux bulles voisines pour en générer une nouvelle, le mécanisme est appelé « neighbor-neighbor pinch-off » (cf. Figure 12). Ces mécanismes ont été observés pour un écoulement stable et pour des canaux larges et droits et où seules les constriction sont incurvées.

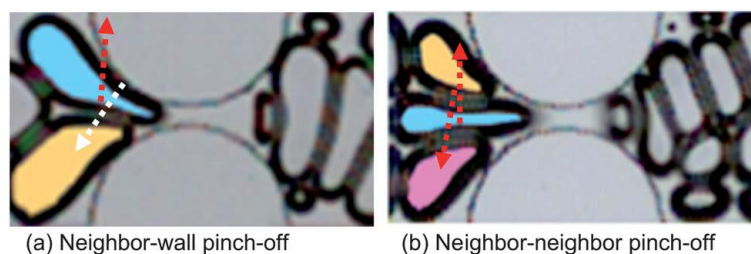


Figure 12 : Photos de mécanismes de Pinch-off. (a) Interaction entre une bulle et la paroi (flèches rouges) « bubble-wall pinch-off ». (b) Interaction entre les bulles (flèche blanche) « bubble-bubble pinch-off » [30].

2. Mécanismes de destruction de la mousse

La survie d'une lamelle dépend principalement de sa pression de disjonction, de la pression capillaire exercée par la structure poreuse et de la perméabilité des films liquides au gaz considéré.

a) Equilibre entre pression capillaire et pression de disjonction

Les films liquides sont constitués de deux interfaces liquides/gaz. Ces deux interfaces sont à l'équilibre grâce à la répulsion électrostatique entre les têtes hydrophiles et à la répulsion stérique et/ou d'hydratation des tensioactifs qui s'opposent à l'attraction de Van Der Walls (cf. Figure 13.a). Cette dernière tend au contraire à réduire l'épaisseur de ces films. La somme de ces interactions (répulsives et attractives) forme ce qu'on appelle la pression de disjonction (une force par unité de surface) :

$$\pi_{disj} = \pi_{VDW} + \pi_{électr} + \pi_{stériq,hydrat} \quad (I.4)$$

Si la pression de disjonction n'existait pas, la pression capillaire notée P_c qui fait intervenir la courbure interfaciale des bords de Plateau pousserait le liquide à circuler sans arrêt des lamelles vers les bords de Plateau.

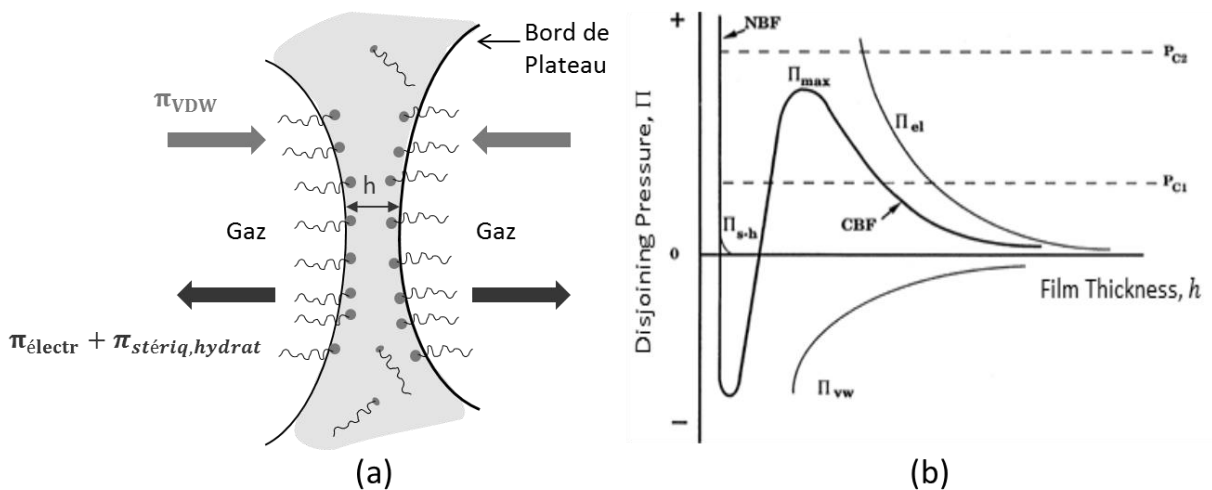


Figure 13 : (a) Schéma des forces exercées sur une lamelle. (b) Courbe de pression de disjonction en fonction de l'épaisseur de la lamelle [36].

La Figure 13.b représente la variation de la pression de disjonction (idéale, non expérimentale) $\pi_{disj}(h)$ (notée $\Pi(h)$ sur la figure) en fonction de l'épaisseur du film liquide h

pour des lamelles statiques. Les valeurs positives reflètent la contribution forte des forces répulsives tandis que les valeurs de $\pi_{disj}(h)$ négatives indiquent la contribution des forces attractives nettes. Par conséquent, les lamelles ne sauraient être dans un état d'équilibre que pour des pentes négatives. Lorsqu'on se trouve sur une pente positive, la moindre perturbation mécanique détruit les lamelles[29]. Pour des épaisseurs de films grandes (au-delà de 7 nm dans le cas du tensioactif Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) [37] par exemple) les forces de répulsion électrostatique dominant. Ces épaisseurs sont nommées les films noirs communs (CBF : Common Black Film). Pour des épaisseurs de films petites (inférieur à 4nm dans le cas du SDS [37]), les forces stériques/d'hydratation dominant. Ces épaisseurs sont nommées les films noirs de Newton (NBF : Newton Black Film) et sont très peu stables.

La ligne horizontale P_{c_1} , révèle la possible existence de trois épaisseurs différentes pour une même pression de disjonction. L'épaisseur de lamelle qui existe réellement dans le milieu poreux est déterminée par l'équation de Young-Laplace (cf. Annexe C) [29] où l'expression de la pression capillaire devient :

$$P_c = 2\sigma C_m + \pi_{disj}(h) \quad (I.5)$$

Où P_c est la pression capillaire locale, C_m la courbure interfaciale moyenne du film liquide et σ est la tension de surface entre la solution liquide et le gaz considéré. La pression capillaire quant à elle dépend de l'endroit où se trouve la lamelle et de la saturation liquide locale. Lorsque la pression capillaire augmente dans le milieu poreux, l'épaisseur des films décroît le long de la branche CBF jusqu'à atteindre Π_{max} puis un film NBF apparaît.

A pression capillaire imposée encore plus grande (P_{c_2}), on atteint une pression de disjonction de rupture où les films se rompent. La pression capillaire correspondante est appelée pression capillaire critique ou pression capillaire limite P_c^* (cf. III.A.3). Pour certains tensioactifs la pression capillaire critique correspond à Π_{max} .

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la description de l'écoulement d'une lamelle dans le cas dynamique en développant des modèles rhéologiques, notamment dans des configurations de géométrie sinusoïdale des pores [38–40]. Jimenez et Radke [39] ont présenté une théorie hydrodynamique pour expliquer la dépendance de la pression capillaire limite au débit de gaz injecté. Ils ont prédit que l'augmentation de la vitesse d'écoulement

contribue à une dégradation plus rapide de la mousse. De même, les lamelles qui traversent les canaux qui varient périodiquement en taille se voient étirées puis comprimées lors de leur écoulement (cf. Figure 14). Ainsi, on observe une oscillation de l'épaisseur de la lamelle au fur et à mesure qu'elle traverse le milieu jusqu'à ce que le liquide interstitiel dans les pores voisins ne puisse plus garantir la stabilité de cette dernière et qu'elle finisse par se rompre. La pression capillaire à ce moment-là est égale à la pression capillaire limite P_c^* .

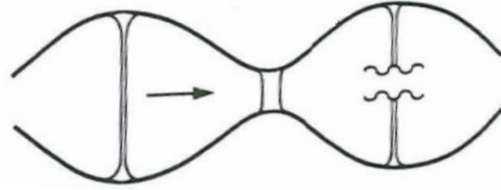


Figure 14 : Une lamelle de mousse en mouvement du gauche vers la droite dans un tube avec des constriction périodiques. La coalescence a lieu dans le 2^{ème} pore [29].

b) Diffusion gazeuse à travers les films

Un autre mécanisme intervenant dans la déstabilisation des lamelles est la diffusion gazeuse. Les films de mousses ne sont pas complètement imperméables au gaz [41]. Les films liquides seront plus au moins perméables au gaz selon le type de gaz et sa capacité de dissolution dans la solution de tensioactifs, l'adsorption des tensioactifs sur les interfaces gaz/liquide, et l'épaisseur et la surface de ces films. Ce phénomène a été notamment discuté pour les expériences utilisant des gaz traceurs comme le Xenon [42] afin d'évaluer la quantité de gaz piégé par la mousse dans le milieu poreux. En effet, une sous-estimation de la diffusion du gaz à travers les lamelles pourrait amener à se tromper facilement sur les quantités de gaz mobiles et piégées par la mousse.

c) Effet de l'huile

L'huile est reconnue pour être un facteur déstabilisant de la mousse dans les milieux poreux. Plusieurs mécanismes ont été proposés dans la littérature [10, 43–45] pour décrire l'interaction entre les films liquides et l'huile. L'huile est en effet néfaste pour la génération de la mousse probablement à cause de l'altération de la mouillabilité de la roche, de la réduction de concentration de tensioactifs au profit de la phase huile, ou à cause de la réduction de la survenance des mécanismes de divisions lamellaires dues au blocage des

branchements de pores par des ganglions d'huile. La réduction de la stabilité de la mousse en interaction avec l'huile est généralement attribuée à l'instabilité des films de pseudo-émulsions qui se forment entre une bulle et l'huile. Toutefois, les mécanismes qui interviennent dans les interactions entre l'huile et les lamelles de liquide demeurent complexes et mal compris.

III. Écoulement des mousses en milieux poreux (Aspects macroscopiques)

A. Comportements transitoire et stationnaire

Lorsqu'une mousse est injectée dans un milieu poreux, elle passe d'abord par une phase d'écoulement transitoire puis atteint une phase stationnaire.

1. Le régime transitoire

La phase transitoire de l'écoulement de la mousse représente les premiers instants de formation de la mousse après son injection. Cette phase est souvent caractérisée par une augmentation de la différence de pression entre l'amont et l'aval du milieu poreux notée ΔP (cf. Figure 15). La plupart des travaux sur la propagation de la mousse en phase transitoire ont été réalisés soit par injection de gaz dans un milieu pré-saturé en tensioactifs [26], soit par co-injection du gaz et une solution de tensioactifs dans un milieu pré-saturé en saumure [46] ou pré-saturé en solution de tensioactifs [47, 48]. Il est vrai qu'un milieu pré-saturé en tensioactifs est plus propice à la forte réduction de la mobilité du gaz en ayant un front de mousse très stable et de très faibles effets de digitations visqueuses. Dans la pratique, on préfère minimiser l'utilisation intensive de tensioactifs pour minimiser le coût de production dans un réservoir. Par ailleurs, tous les phénomènes intrinsèques à l'interaction entre les tensioactifs et le milieu solide (adsorption, partitionnement, dégradation thermique) peuvent influencer significativement les mécanismes microscopiques de génération de la mousse.

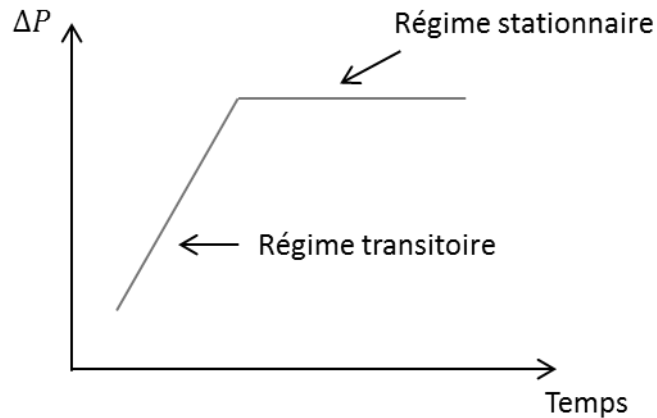


Figure 15 : Schéma d'évolution de la pression lors du régime transitoire puis stationnaire.

Les travaux utilisant des techniques d'imagerie, notamment de tomographie-X [42, 49–51] et de RMN [52], révèlent l'avancement de la mousse en deux étapes avec formation d'un premier front net, suivi d'une phase dite de « désaturation liquide secondaire » ou *secondary liquid desaturation*. Plus précisément, Zitha et al. [53] ont observé principalement trois régions distinctes (cf. Figure 16) : en amont du milieu poreux une faible saturation liquide, en aval une forte saturation et au milieu une saturation moyenne avec quelques effets de digitation visqueuse. Dans la région amont où se forme la mousse, l'effet de désaturation liquide secondaire prend effet dès l'injection. Après la percée de la mousse, cet effet de désaturation devient très visible [49]. Si on se place sur une même position le long de la carotte, on peut observer que la saturation liquide diminue au cours du temps. La désaturation liquide secondaire s'expliquerait par l'augmentation des forces visqueuses, qui forcent la mousse à pénétrer de plus en plus dans des petits pores après avoir envahi les gros pores. L'expansion du gaz contribue aussi à augmenter ces forces visqueuses en favorisant le mouvement des lamelles et leur génération, induisant un affinement de la texture de la mousse en aval [54].

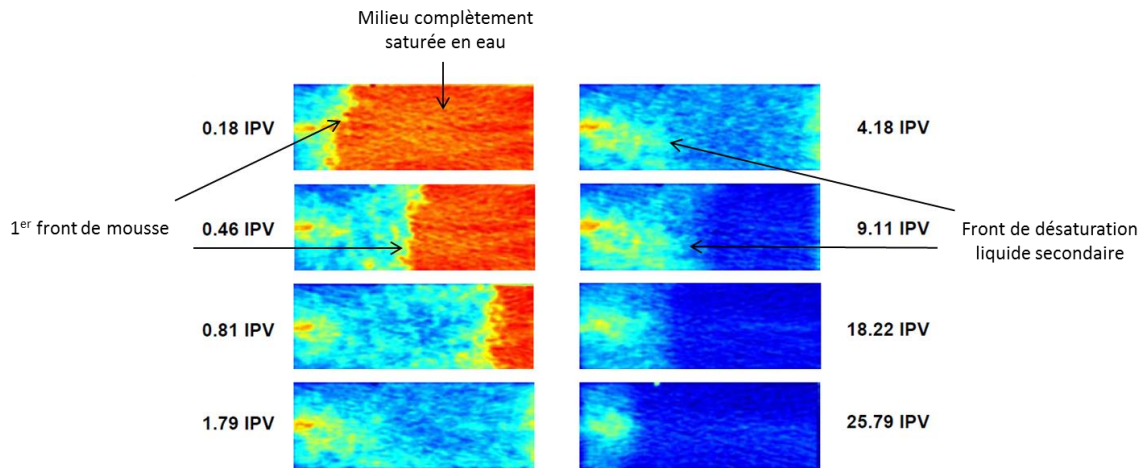


Figure 16 : Déplacement transitoire de la mousse dans un grès de Bentheimer initialement saturé en tensioactifs. La couleur rouge indique une grande présence de liquide tandis que la couleur bleu fait référence au gaz. La mousse traverse la carotte et perce après 0.8IPV. Après la percée, un front de désaturation liquide secondaire apparaît au milieu et se propage vers l’entrée et la sortie de la carotte (adaptée de [53]).

En réalité, l’état de mousse forte intervient pendant et après la désaturation liquide secondaire. Pendant cette phase, il se crée un nombre important de lamelles qui sont mobilisées par la suite. Ceci nécessite un gradient de pression minimum ∇P^{min} (ou de manière similaire une vitesse minimale v_{min}) [27, 55, 56] (cf. Figure 17); ce phénomène rejoint la description de la mousse comme un fluide à seuils hors milieu poreux [16]. En deçà de ce gradient de pression, les bulles ne s’écoulent plus et restent piégées. Selon Rossen et al., [55], l’amplitude de ∇P^{min} dépend de la forme du pore, de la texture de la mousse, de la perméabilité et de la tension interfaciale. Pour une mousse de texture moyenne (des bulles de 400 μm de diamètre hors milieu poreux), on obtient $\nabla P^{min} = 0.1$ à 0.32 bar/m pour une mousse à base de CO_2 et de 1.25 à 2.4 bar/m pour des mousses générées avec d’autres types de gaz. ∇P^{min} diminue lorsque les tensions interfaciales diminuent [57] et est plus grand pour des rapports d’aspect pore-seuil élevés (rayon de pore/rayon de seuil), des pores anguleux, des seuils de pores étroits et des pressions capillaires faibles.

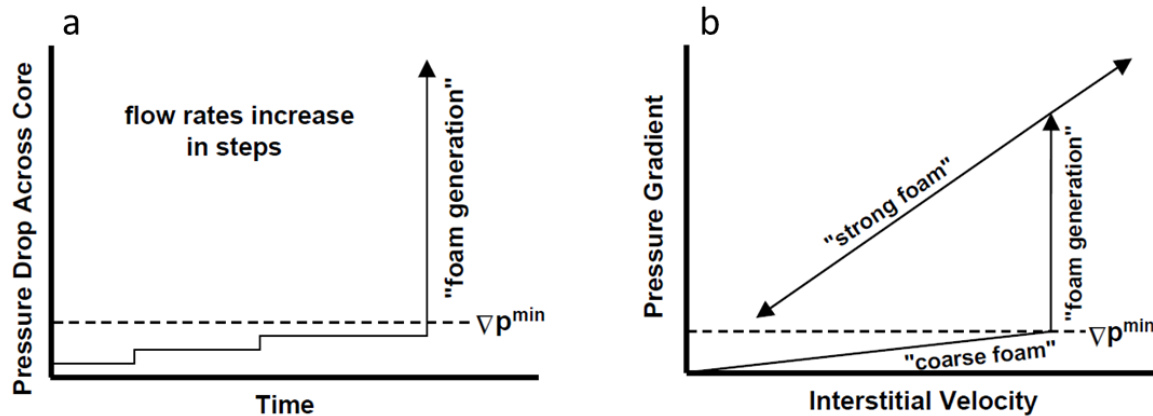


Figure 17 : Schéma de gradient de pression minimum pour la génération de la mousse. (a) Augmentation de ΔP en fonction du temps lors de l'augmentation du débit d'injection par palier. (b) Relation entre le gradient de pression et la vitesse interstitielle (adaptée de [58]).

2. Les régimes d'écoulement stationnaire

En réalisant plusieurs expériences d'écoulement de mousses dans un milieu poreux formé de grains de sable, Osterloh et Jante [48] ont identifiés deux régimes distincts à l'état stationnaire (cf. Figure 18) :

- Un **régime basse qualité** où le gradient de pression est indépendant de la vitesse de liquide et est dépendant de la vitesse de gaz. Dans ce régime, l'avancement de la mousse est régi par des intermittences entre écoulement et piégeage des bulles. La résistance capillaire et le piégeage de gaz sont les principaux mécanismes qui contrôlent ce régime. En plus, il semble établi que dans ce régime, la texture de la mousse (nombre de bulles par unité de volume) reste constante avec une taille de bulle moyenne de l'ordre de la taille du pore et qu'un comportement d'écoulement rhéo-fluidifiant est observé [59].
- Un **régime haute qualité** où le gradient de pression est indépendant de la vitesse de gaz et est dépendant de la vitesse du liquide. Ce régime est contrôlé par la coalescence des bulles, la pression capillaire et les effets stabilisateurs de tensioactifs (type et concentration) [59, 60]. L'écoulement de la mousse dans ce régime est complexe.

La zone de transition entre les deux régimes définit une qualité de mousse critique ou optimale notée f_g^* . À cette qualité de mousse, le gradient de pression est maximal pour une vitesse d'écoulement donnée. Dans cette phase de transition, tous les mécanismes de déstabilisation de la mousse jouent un rôle dans son écoulement.

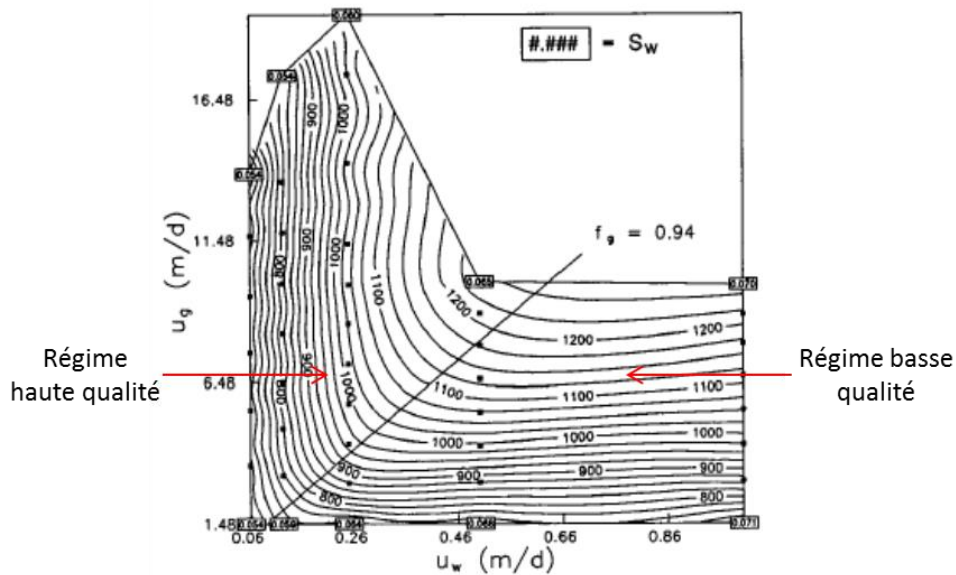


Figure 18 : Contours iso-gradients de pressions mesurés en régime stationnaire en fonction des vitesses superficielles de liquide notée U_w et de gaz notée U_g (adaptée de [48]). Les vitesses sont exprimées en mètres par jour. Sur cette figure, le régime haute qualité correspond à la partie supérieure gauche. Le régime basse qualité correspond à la partie inférieure droite. $f_g^* = 0.94$.

3. Le concept de « pression capillaire limite »

La stabilité de la mousse dépend de la pression capillaire exercée par le milieu poreux et les conditions expérimentales d'écoulement. A l'échelle microscopique, les lamelles ne coalescent pas toutes d'un coup à une certaine pression capillaire. En effet, comme discuté auparavant, cela dépendra de la géométrie du canal pore-seuil considéré et de la fraction locale de gaz par rapport au liquide.

A l'échelle macroscopique, la pression capillaire augmente en fonction de la saturation de gaz, lorsque le gaz envahit le réseau poreux (comme pour un processus de drainage). La saturation de gaz quant à elle est susceptible d'augmenter lorsque la qualité de mousse augmente (cf. Figure 19 à gauche). Si cette qualité est augmentée au-delà de la valeur critique f_g^* , il est prédit théoriquement que la pression capillaire atteint la pression capillaire limite P_c^* puis ne change plus, alors que la texture de la mousse diminue et la taille des bulles augmente [60] (cf. Figure 19 à droite). Ce concept, largement utilisé dans les modèles de mousses en milieux poreux [61], traduit le mécanisme de coalescence des bulles qui génère une redistribution du liquide des bords de Plateau vers les films liquides voisins afin de maintenir le système à une saturation liquide fixe S_w^* (cf. Figure 19. A droite). Il faut noter que le

concept de pression capillaire limite P_c^* est très analogue au concept de pression de disjonction critique pour les mousses *Bulk* au-delà duquel les films liquides sont rompus [61]. P_c^* serait une fonction croissante de la concentration de tensioactifs, décroissante en fonction de la perméabilité et des vitesses d'injection [60].

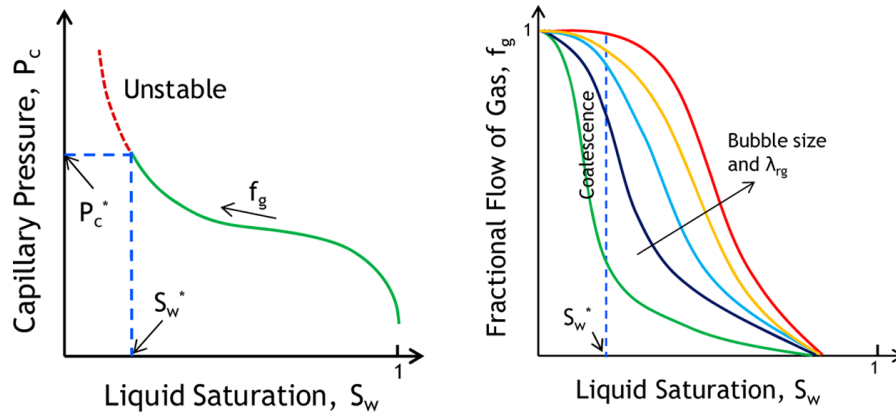


Figure 19 : Schémas d'évolution de la pression capillaire en fonction de la saturation liquide S_l (notée sur la figure S_w) lors de l'augmentation de la qualité de mousse f_g (à gauche). Schéma du mécanisme de coalescence lorsque la pression capillaire limite $P_c^*(S_w^*)$ est atteinte (à droite) (adaptée de [60, 61]).

B. Paramètres influençant l'écoulement de la mousse

L'écoulement de la mousse dans un milieu poreux fait intervenir une multitude de paramètres qui vont de la contribution et l'interaction des phases entre elles (liquide, gaz et solide) aux caractéristiques intrinsèques à la rhéologie des écoulements de mousses dans les milieux confinés. Tous ces paramètres influencent plus ou moins l'écoulement de la mousse à différentes échelles. On présente dans les paragraphes suivants quelques paramètres qui influencent l'écoulement des mousses en milieux poreux.

1. Effets d'injection des fluides

L'utilisation d'un système de pré-génération de la mousse (mousseur) ne change pas globalement la texture de la mousse en sortie du milieu poreux étudié. Falls et al. [22] ont étudié la mobilité d'une mousse pré-générée avec une taille de bulle bien identifiée. Ils ont conclu que la texture de la mousse en sortie du deuxième milieu poreux n'est pas affectée par les caractéristiques géométriques du premier milieu poreux. Les travaux de Baghdikian et Handy [62] montrent aussi qu'il n'y a pas d'effets significatifs de l'utilisation du générateur de mousse sur la texture finale. En revanche, Ettinger et Radke [24], précisent que l'effet de

l'expansion de gaz en sortie à cause de la différence de pression qui règne à l'intérieur du milieu poreux et en sortie, conduit à une surestimation de la taille moyenne de la bulle si celle-ci est mesurée à l'extérieur du milieu poreux. Ils concluent tout de même que le milieu poreux ajuste la taille des bulles à l'image de la taille des pores.

2. Effets d'entrée

La répartition spatiale de la mousse à l'échelle du milieu poreux n'est pas uniforme. En effet, la mousse présente une saturation liquide plus grande à l'entrée du milieu où est réalisée l'injection [54, 63] du gaz et de la solution de tensioactifs. Ces régions d'entrée se caractérisent aussi par des gradients de pression généralement faibles [24, 26, 64]. Il se forme alors un front entre la région amont et la région aval du milieu poreux qui caractérise un changement abrupt de la texture [65] (Au-delà du front, une texture fine tandis qu'en amont on trouve une mousse grossière ou faible). La longueur sur laquelle se forme cette région d'entrée fait l'objet de plusieurs études contradictoires. Par exemple, Myers et Radke [66] rapportent des régions d'entrée d'environ 15 cm sur une longueur totale de 60 cm, et affirment que les carottes de roche très courtes sont particulièrement influencées par les effets d'entrée contrairement aux carottes de roche longues. D'autres études ne trouvent pas ou très peu de régions d'entrée [24, 26, 64, 67]. La longueur caractéristique de la région d'entrée serait fonction de plusieurs paramètres, incluant le type de gaz, les vitesses d'injection, le type et la concentration des tensioactifs entre autres.

3. Perméabilité de la roche

La perméabilité de la roche et les variations de la perméabilité affecte la mobilité de la mousse [27, 68]. En ce qui concerne la génération de la mousse, Gauglitz et al., [58] trouvent que pour un milieu granulaire formé de billes ou de sable le ∇P^{min} varie comme l'inverse de la perméabilité K , tandis que Rossen et Gauglitz [55] et Tanzil et al., [56] affirment que ∇P^{min} varie comme $K^{-1/2}$. En ce qui concerne la mobilité de la mousse à l'état stationnaire, Lee et al., [69] ont étudié la viscosité apparente de la mousse en fonction de la perméabilité pour différents types de roches. Ils ont trouvé que la viscosité apparente augmente de manière non linéaire en fonction de la perméabilité (cf. Figure 20). Bertin et al., [70] ont réalisé des expériences d'écoulement de mousse dans un milieu hétérogène et ont montré que la vitesse interstitielle du gaz de la mousse qui envahit un milieu saturé en liquide, était plus élevée dans les zones où la perméabilité est grande par rapport aux zones où la perméabilité est faible.

Kovscek et Bertin [71] ont montré théoriquement que la dissipation visqueuse associée à la structure de la mousse permet de déduire une loi en puissance qui relie la viscosité effective du gaz moussant à la perméabilité du milieu poreux avec un exposant qui vaut $3/2$. Contrairement à un fluide Newtonien, Il est possible que la structure de la mousse ne soit pas la même pour des milieux poreux de perméabilités très différentes, et c'est ce qui expliquerait une dépendance non-linéaire de la viscosité de la mousse au paramètre de perméabilité.

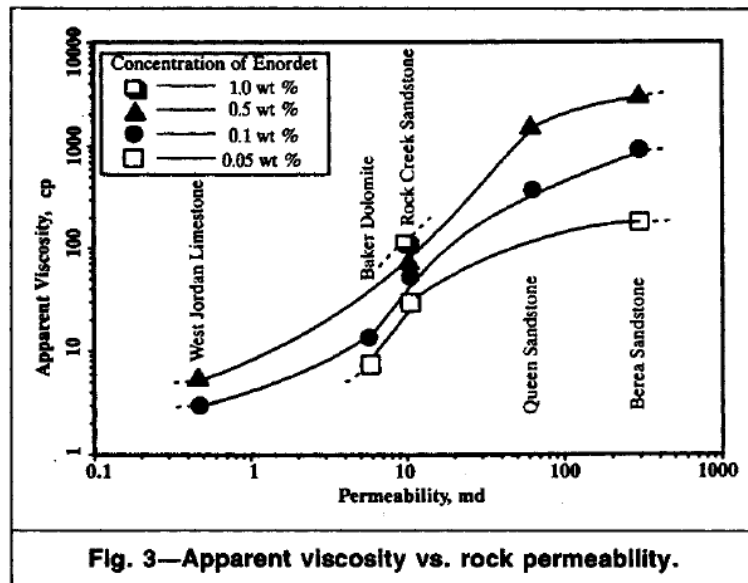


Figure 20 : Effet de la perméabilité de la roche sur la viscosité apparente de la mousse [69].

4. Type de gaz

La plupart des études expérimentales des mousses en milieux poreux utilisent soit des mousses à base d'azote N_2 ou des mousses à base de dioxyde de carbone CO_2 . Des études comparatives ont montré que les premières génèrent des gradients de pression plus grands que les deuxièmes [72, 73]. En effet, les mousses CO_2 restent plus faibles que les mousses N_2 , et l'effet de désaturation liquide des mousses est moins élevé pour les mousses CO_2 que pour les mousses N_2 . On a attribué cette faiblesse des mousses CO_2 à la solubilité de ce dernier dans l'eau qui est 55 fois plus grande que celle de N_2 [72]. Cette grande solubilité du gaz dans le liquide favorise la diffusion du gaz et donc la coalescence des bulles. Des visualisations par tomographie X ont montré un front net pour les mousses N_2 et un front diffus pour les mousses CO_2 lors de l'écoulement dans un grès [72].

5. Concentration de tensioactifs

Une solution concentrée en tensioactifs permet de stabiliser les films liquides et les rendre plus résilients aux perturbations mécaniques lors de l'écoulement de la mousse. La mobilité de la mousse diminue et la stabilité de la mousse augmente avec la concentration de tensioactifs [61, 74].

IV. Réduction de la mobilité du gaz par la mousse

Il est généralement admis que la mousse réduit la mobilité de la phase gazeuse et a peu d'effets sur la phase liquide. Ceci conduit les théoriciens à décrire les caractéristiques pétrophysiques de la mousse¹ comme étant intimement liés à la perméabilité relative du gaz dans la mousse (k_{rg}^f) et/ou à sa viscosité effective (μ_g^f). Même si ces phénomènes peuvent être séparés physiquement, ils ne peuvent l'être d'un point de vue mathématique parce qu'ils sont liés par la loi de Darcy (cf. Annexe A). Ainsi, la vitesse du gaz peut être reliée au gradient de pression généré par la loi suivante :

$$u_g^f = - \frac{K k_{rg}^f \nabla P_g}{\mu_g^f} \quad (\text{I.6})$$

Où u_g^f est la vitesse de darcy du gaz dans la mousse, K la perméabilité du milieu poreux, k_{rg}^f la perméabilité relative du gaz, μ_g^f la viscosité effective du gaz et ∇P_g le gradient de pression de la phase gazeuse. La mobilité du gaz moussant λ_g^f est par ailleurs décrite par la loi suivante :

$$\lambda_g^f = \frac{k_{rg}^f}{\mu_g^f} \quad (\text{I.7})$$

De cette relation, on déduit que la réduction de la mobilité du gaz grâce à la mousse se fait essentiellement soit par la réduction de la perméabilité relative du gaz ou par l'augmentation de sa viscosité effective. En réalité, la loi de Darcy suppose que la phase gazeuse soit continue, or cette phase est formée de bulles de gaz séparées par une fraction liquide qui évolue dans le temps et même dans l'espace selon les échelles (Nous reviendrons sur ce point plus loin). Dans une certaine mesure, lorsque la mousse devient fine, telle une mousse forte, on peut ignorer la phase liquide et considérer la pression de la mousse égale à la pression du gaz [75].

¹ Par la suite et sauf mention contraire, la mousse désignera la phase gazeuse dans la mousse

L'évolution des paramètres de viscosité et de perméabilité en fonction des caractéristiques de l'écoulement (vitesse, pression, saturation, température, etc.), des caractéristiques du milieu poreux (taille de pore, distribution des pores et seuils, etc.) et des caractéristiques des fluides (type, concentration, salinité, etc.) ont fait l'objet de plusieurs études plus ou moins empiriques et ont donné naissance à un large éventail de modèles [75–77] qui ne font pas l'objet de cette thèse et ne seront mentionnés que brièvement et à des fins de compréhensions des phénomènes physiques qui sous-tendent l'écoulement des mousses en milieu poreux.

A. Viscosité effective du gaz

La viscosité effective du gaz dans la mousse et par abus de langage « de la mousse », est définie comme la viscosité d'un fluide Newtonien qui s'écoulerait à la même vitesse, dans la même géométrie du milieu poreux, et dans les mêmes conditions de gradient de pression [21].

Les travaux précurseurs de Bretherton [78] et après lui de Hirasaki et Lawson [21] ont permis de déduire un modèle rhéologique de l'écoulement d'un train de bulles dans un tube capillaire. Ces modèles considèrent que la taille de bulle est liée directement à l'augmentation de la résistance à l'écoulement du gaz, exprimée par la différence de pression totale induite ΔP . Ainsi, en extrapolant ces travaux pour des milieux poreux, différents auteurs [32, 79–83] ont proposé la relation suivante, pour exprimer la viscosité effective non-Newtonienne du gaz moussant :

$$\mu_g^f = \mu_g + \frac{C_f n_f}{v_{int_g}^c} \quad (\text{I.8})$$

Où μ_g est la viscosité dynamique du gaz, n_f est la texture de la mousse, C_f est une constante de proportionnalité liée à la perméabilité du milieu poreux et à l'interaction entre la roche et le liquide [21, 22] et c un exposant entre 0 et 1 qui représente l'effet rhéo-fluidifiant de la mousse en écoulement. En l'absence de mousse ($n_f = 0$), on retrouve la viscosité du gaz seul.

Dans un milieu poreux, les canaux ont des géométries variables avec des pores et des seuils qui varient en taille. Il existe généralement une distribution statistique des tailles de

bulle qui affecte l'écoulement de la mousse selon l'échelle considérée et les mécanismes qui entrent en jeu [84]. Les travaux qui permettent de déceler ces mécanismes ont été récemment réalisés sur des micro-modèles par Géraud et al., [84]. Il trouve que le champ de vitesse des bulles varie localement et suit aussi une loi de distribution spécifique à l'échelle du réseau (cf. Figure 21). Ceci explique l'existence de chemins préférentiels pour la mousse dans de larges canaux interconnectés. En plus, il montre que ces chemins ne sont pas figés dans le temps mais intermittents ; un phénomène qui serait relié aux fluctuations de la pression capillaire locale selon l'endroit où se trouve la bulle et le changement de la concavité des films liquides. Cette répartition spatiale de la vitesse serait aussi influencée par la distribution des tailles de bulles (cf. Figure 21.b).

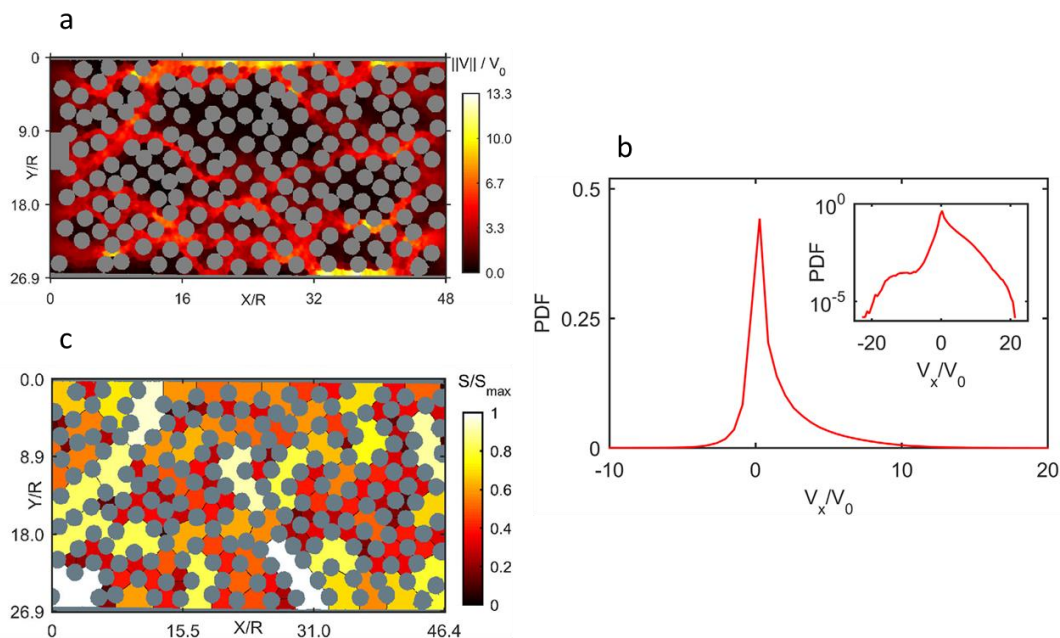


Figure 21 : État stationnaire de l'écoulement de la mousse. (a) Cartographie spatiale des vitesses des bulles normalisées par la vitesse moyenne V_0 . (b) Densité de probabilité de la vitesse normalisée par la vitesse moyenne V_0 . (c) Cartographie spatiale de la géométrie de pores. Les couleurs claires indiquent de larges pores [adaptée de 84].

B. Perméabilité relative du gaz

La perméabilité relative du gaz moussant rend compte de la manière dont les bulles s'écoulent dans le réseau poreux. En réalité le gaz n'est pas totalement en écoulement et une grande fraction de gaz reste piégée [15, 85, 86]. Par conséquent, le nombre de canaux qui sont disponibles pour transporter les bulles de gaz est beaucoup plus faible en présence qu'en l'absence de mousse. Cette « gêne » créée par le gaz piégé serait en partie responsable de la

résistance à l'écoulement du gaz. Ainsi, la perméabilité relative de la phase gaz de la mousse k_{rg}^f serait liée à la saturation de gaz mobile S_g^f (rapport du volume de gaz mobile sur le volume poreux) par la loi suivante [29] :

$$k_{rg}^f = k_{rg}^0 (S_g^f)^u \quad (\text{I.9})$$

Où S_g^f est exprimée selon l'équation suivante :

$$S_g^f = X_f (1 - S_l^f) \quad (\text{I.10})$$

Et

$$S_l^f = \frac{S_l - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \quad (\text{I.11})$$

Ici S_l , S_{wc} et S_l^f désignent respectivement les saturations liquide totale, la saturation irréductible en eau et la saturation liquide de la mousse mobile.

La fraction de gaz mobile s'écrit selon l'équation suivante :

$$X_f = \frac{S_g^f}{S_g} = \frac{S_g^f}{S_g^f + S_g^t} \quad (\text{I.12})$$

Où S_g et S_g^t sont respectivement les saturations de gaz total et de gaz immobile. k_{rg}^0 désigne la perméabilité relative du gaz correspondante à l'état S_{wc} et u un exposant.

Il est clair qu'avec cette définition, l'écoulement de la mousse est comparé à un écoulement diphasique gaz/eau sans tensioactifs (avec les paramètres u , S_{wc} et k_{rg}^0) (cf. Annexe B), et que pour caractériser l'écoulement de la mousse il faut aussi déterminer les valeurs de saturation et de fraction du gaz piégé.

L'utilisation des différents paramètres cités ci-dessus nécessite leur quantification. Les saturations sont souvent déterminées par des méthodes de mesure optique ou magnétique telles que les rayons gamma [47], la résonance magnétique nucléaire [52] (RMN) ou par tomographie-X [51]. En revanche, il est difficile de connaître la fraction de gaz piégé car il

faut dissocier la mousse mobile de la mousse immobile lors de l'écoulement. Gillis et Radke [15] ont utilisé un gaz traceur d'hexafluorure de soufre SF_6 en combinaison avec du diazote N_2 et ont mesuré par chromatographie en phase gaz une fraction de gaz piégé comprise entre 80% et 100%. Nguyen [51] a utilisé le Xenon comme gaz traceur pour des mesures en tomographie-X et reporte des quantités de gaz piégé plus grandes à la sortie de la carotte (jusqu'à 77%) qu'en entrée (jusqu'à 58%). Il montre aussi que le gaz est plus piégé dans une carotte positionnée horizontalement que dans une carotte placée verticalement. Il conclut aussi que le débit de gaz n'a pas d'effet sur la fraction de gaz piégée contrairement au débit liquide. Tang et al., [67] trouvent quant à eux une fraction de gaz piégée de l'ordre de 80% qui diminue si la vitesse de gaz ou si le ratio de vitesses gaz/liquide augmente. Jones et al., [87] rapportent des fractions de gaz piégé comprises entre 10% et 70%, fractions qui diminuent avec la vitesse totale et la qualité de la mousse. Enfin, les différents auteurs s'accordent sur la grande proportion de gaz piégé par la mousse.

V. Conclusion du premier chapitre

Ce premier chapitre nous a permis de résumer les travaux issus de la littérature, qui permettent de décrire les écoulements des mousses en milieux poreux. La mousse présente une structure complexe à l'état statique. A cela, se rajoute la complexité de la dynamique de formation et de destruction de la mousse au sein du milieu poreux. A l'échelle globale du milieu poreux, cette dynamique peut être quantifiée à l'aide de paramètres tels que la pression ou la saturation qui nous permettent de distinguer les régimes d'écoulement et d'accéder à une description macroscopique de la mousse en fonction des paramètres d'injection tels que les débits ou la qualité de la mousse. Dans le chapitre suivant, nous présentons notre propre étude macroscopique de l'écoulement d'une mousse dans une carotte de roche à l'aide d'un Scanner X.