



HAL
open science

ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UNE COUCHE DE POLYMÈRE ADSORBÉ SUR DES ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES (GAZ/EAU) DANS DES MILIEUX POREUX MODÈLES

Vincent Blanchard

► **To cite this version:**

Vincent Blanchard. ÉTUDE DE L'INFLUENCE D'UNE COUCHE DE POLYMÈRE ADSORBÉ SUR DES ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES (GAZ/EAU) DANS DES MILIEUX POREUX MODÈLES. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2005. Français. NNT: . tel-00079096

HAL Id: tel-00079096

<https://theses.hal.science/tel-00079096>

Submitted on 8 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de l'influence d'une couche de polymère
adsorbé sur des écoulements diphasiques (gaz/eau)
dans des milieux poreux modèles

Vincent Blanchard

2 mars 2006

“La francophonie, c’est un vaste pays, sans frontières. C’est celui de la langue française. C’est le pays de l’intérieur. C’est le pays de l’invisible, spirituel, mental, moral qui est en chacun de vous. Si vous voulez vous en emparer, puis l’acquérir, le posséder, en être le roi ou la reine, vous n’avez qu’à bien apprendre votre langue, Ca vous appartient tous les jours.”

Gilles VIGNEAULT, Poète québécois

“J’ai confiance qu’un jour, y’a un rendez-vous normal avec l’histoire que le Québec tiendra et j’ai confiance qu’on sera là ensemble pour y assister.”

René LEVESQUE, Fondateur du Parti Québécois

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser à Monsieur le Professeur **Michel COMBARNOUS** mes profonds et sincères remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de Thèse. Je lui exprime ma reconnaissance pour la disponibilité et l'attention permanente dont il a fait preuve à mon égard au cours de ces trois années.

Je remercie également Messieurs les professeurs **Daniel BROSETA** et **Mostapha FOURAR** d'avoir acceptés d'être les rapporteurs de mon travail. Leurs remarques et critiques positives ont permis d'améliorer de façon constructive le travail de rédaction.

Je tiens également à exprimer mes plus sincères remerciements à l'équipe d'encadrement de cette thèse :

- à mon directeur, **Henri BERTIN**, Directeur de Recherche C.N.R.S. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour sa disponibilité permanente, ses conseils et son soutien, et plus particulièrement, pour l'aspect humain qu'il a su y apporter et ses encouragements constants. Je le remercie de m'avoir soutenu afin d'obtenir un avenant de contrat dans le but d'affiner et d'améliorer ce travail ;
- à mon co-directeur, **Didier LASSEUX**, Chargé de Recherche C.N.R.S., pour s'être entièrement investi dans ce travail. Sa disponibilité, ses conseils et son professionnalisme ont largement contribué à l'accomplissement de cette étude. Ses encouragements m'ont permis de ne jamais perdre confiance dans les moments les plus délicats ;
- à **Alain ZAITOUN**, Docteur Ingénieur à l'IFP. Je tiens à lui adresser ma profonde gratitude pour m'avoir fait profiter de ses compétences sur le sujet. Je lui exprime par ailleurs ma reconnaissance pour sa contribution à l'amélioration du mémoire ;
- à **Thierry PICHERY**, Chef de Projet/Expert puits à GDF. Particulièrement concernant l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour le soutien financier complémentaire qui a rendu possible mes deux mois de recherche supplémentaires.

J'associe à ces remerciements Messieurs **Guy CHAUVETEAU** et **René TABARY**, respectivement docteur et ingénieur à l'IFP, pour leur expertise dans le domaine des macromolécules en solution ainsi que **Nicolas BLIN**, technicien à l'IFP, pour son aide pratique et son accueil chaleureux.

Un grand merci à toute l'équipe technique du laboratoire TREFLE pour leur assistance. Tout particulièrement : **Alain OCHSENHOFFER** pour sa disponibilité permanente, **Dimitri JAUPART** pour la réalisation de la structure du banc expérimental et **Frédéric LAPEGUE** pour son aide précieuse en informatique.

Une pensée toute particulière pour mon ami et collègue **Gustavo CACERES-SALAZAR**. Je le remercie pour son soutien, ses conseils et pour les bons moments partagés.

A **Michel GIRARD**, Directeur Général à Atrium, je lui exprime ma profonde amitié pour ses précieux conseils en gestion de projet et en management. Les messages qu'il a su me faire passer me seront très utiles tout au long de ma vie professionnelle et en particulier au Québec.

Pour finir, à ma tendre et chère **Chantale MORIN**, je tiens à lui exprimer tout mon amour et ma reconnaissance pour sa patience et ses nombreuses relectures. Merci pour le temps qu'elle a su accorder à mon travail, malgré ses obligations professionnelles.

Table des matières

1	Introduction	8
2	Écoulements en milieu poreux	12
2.1	Définitions et généralités	13
2.2	Écoulements monophasiques	15
2.2.1	Équations générales à l'échelle du pore	15
2.2.2	Nombres de Reynolds et de Knudsen	16
2.2.3	Modèle de Stokes	17
2.2.4	Changement d'échelle	18
2.2.5	Modèles décrivant les écoulements à l'échelle locale	19
2.3	Effet Klinkenberg	24
2.4	Écoulements diphasiques	26
2.4.1	Équations générales	26
2.4.2	Tensions interfaciales - Forces capillaires	26
2.4.3	Pression capillaire	28
2.4.4	Mouillabilité	28
2.4.5	Loi de Darcy Généralisée	30
2.4.6	Saturation	30
2.4.7	Perméabilité effective (écoulements gaz/eau)	31
2.4.8	Perméabilité relative	31
2.5	Conclusions	32

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	5
3 Solutions de polymère	34
3.1 Définitions et généralités	34
3.2 Polymérisation et masse moléculaire	36
3.2.1 Polymérisation	36
3.2.2 Masse moléculaire	36
3.3 Rayon de giration	37
3.4 Polymères en solution	38
3.4.1 Solvant	38
3.5 Propriétés rhéologiques	39
3.5.1 Rhéologie des solutions de polymère hors milieu poreux	39
3.5.2 Rhéologie des solutions de polymère en milieu poreux	41
3.5.3 Effet de la géométrie du milieu poreux	41
3.5.4 Effet de paroi sur la viscosité apparente d'une solution de polymère	43
3.6 Stabilité des polymères	43
3.7 Mécanismes de rétention et d'adsorption des polymères en milieu poreux	44
3.7.1 Effet du volume de pores inaccessibles	45
3.7.2 Couche de déplétion	47
3.7.3 Phénomène d'adsorption de polymère en milieu poreux	47
3.8 Conclusions	48
4 Écoulement en présence de polymère	49
4.1 Réduction sélective de perméabilité - Réduction de mobilité	49
4.2 Mécanismes à l'origine de la réduction sélective de perméabilité	50
4.2.1 Effet de gonflement / contraction de la couche de polymère adsorbé	50
4.2.2 Écoulements partitionnés des fluides	52
4.2.3 Modification de mouillabilité	52

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	6
4.2.4 Effet de paroi	53
4.2.5 Effet de la présence d'une gouttelette de gel ("gel-droplet model")	54
4.2.6 Effet du polymère sur la pression capillaire	55
4.3 Conclusions	55
5 Effet Klinkenberg en présence de polymère	57
5.1 Description du projet expérimental	57
5.1.1 Caractéristiques et préparation des fluides	58
5.1.2 Caractéristiques des milieux poreux	59
5.1.3 Méthodes de mesure	59
5.2 Procédure expérimentale	62
5.2.1 Dispositif expérimental	62
5.2.2 Protocole expérimental	63
5.3 Résultats	65
5.3.1 Massifs secs	65
5.3.2 Massifs partiellement saturés en saumure	70
5.3.3 Massifs partiellement saturés en présence de polymère	77
5.3.4 Comparaison des résultats	82
5.4 Conclusions	84
5.5 Annexe 1 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC sec	86
5.6 Annexe 2 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC à différentes $S_w(Q_{1max})$	88
5.7 Annexe 3 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC en présence de PAM	94

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	7
6 Effets inertiels en présence de polymère	96
6.1 Description du projet expérimental	97
6.1.1 Caractéristiques et préparation des fluides	97
6.1.2 Caractéristiques des milieux poreux	97
6.1.3 Méthodes de mesure	98
6.2 Procédure expérimentale	99
6.2.1 Dispositif expérimental	99
6.2.2 Protocole expérimental	100
6.3 Résultats	102
6.3.1 Massifs secs	102
6.3.2 Massif partiellement saturé	105
6.3.3 Massif partiellement saturé en présence de polymère	110
6.4 Conclusions	117
7 Conclusions et perspectives	118
Bibliographie	130

Chapitre 1

Introduction

Cette étude a été réalisée au laboratoire Transferts, Écoulements, Fluides, Énergétique (TREFLE) Unité Mixte du CNRS, Université Bordeaux 1, ENSCPB et ENSAM. Elle a été rendue possible grâce au soutien financier de l'Institut Français du Pétrole (IFP) et de Gaz de France (GDF).

La problématique de ce travail est d'étudier l'influence d'une couche de polymère adsorbé dans un milieu poreux sur des écoulements gaz/eau. Des expériences ont déjà montré que la présence d'une couche de polymère adsorbé avait pour conséquence de réduire sélectivement la perméabilité à l'eau par différents mécanismes qui seront détaillés dans ce rapport. Par ailleurs, des expériences préliminaires ont montré que la présence de polymère pouvait réduire sensiblement les effets inertiels observés à débits élevés de gaz. Après une introduction générale, des rappels succincts sur les écoulements polyphasiques, les propriétés des polymères utilisés et les travaux déjà réalisés dans ce domaine sont évoqués. Pour finir, les résultats obtenus sont présentés.

Le contexte général de cette étude est celui du génie pétrolier et gazier, et concerne plus particulièrement l'exploitation des gisements d'hydrocarbures et le stockage souterrain de gaz naturel.

De manière très schématique, l'extraction d'hydrocarbures depuis un réservoir, peut se résumer à trois étapes :

- **récupération primaire** : la pression du fluide présent dans la roche-réservoir est supérieure à la pression de surface. Ce gradient de pression permet l'écoulement naturel du fluide de la roche-réservoir vers les puits producteurs en surface. Ce phénomène diminue avec la pression dans le réservoir ;
- **récupération secondaire (FIG. 1.1)** : lorsque le gradient de pression n'est plus suffisant pour obtenir un écoulement, du gaz ou de l'eau est injecté dans la roche-réservoir, ce qui permet d'établir de nouveau un gradient de pression suffisant pour obtenir une mobilisation de l'hydrocarbure vers les puits producteurs ;

- **récupération tertiaire** (*aussi appelée récupération assistée ou améliorée*) : cette phase consiste à récupérer les hydrocarbures présents dans la roche-réservoir après les deux premières étapes. Elle peut notamment consister à injecter un fluide plus visqueux que l'eau, afin d'améliorer l'efficacité du balayage.

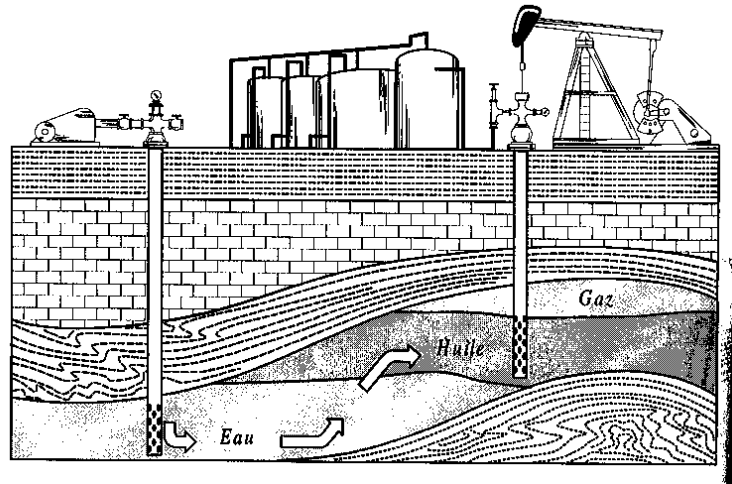


FIG. 1.1 – *Récupération secondaire.*

De nos jours ces trois étapes ne sont plus suivies de manière systématique. En effet, depuis plusieurs années, la méthode de récupération la plus adaptée est opérée dès le début de l'exploitation d'un gisement.

A un stade plus ou moins avancé de l'exploitation, la récupération des hydrocarbures peut s'avérer faible suite à la mise en place de divers mécanismes conduisant à un balayage médiocre. Par exemple, une différence de viscosité importante entre le fluide déplaçant et celui déplacé ou une forte hétérogénéité du réservoir peut entraîner un piégeage d'hydrocarbures et une percée du fluide injecté, ce qui entraîne une **venue d'eau excessive aux puits producteurs** (ceci constitue un problème majeur pour les compagnies pétrolières, car si cette production d'eau est trop importante le puits devient non rentable entraînant ainsi une fermeture prématurée).

Dans le domaine du génie gazier, il est courant de stocker le gaz naturel dans des aquifères. Pour cela, des puits sont forés pour permettre l'injection puis le soutirage de quantités importantes de gaz.

Afin d'augmenter la durée de vie et la productivité des puits, les industriels et les laboratoires ont amorcé des recherches sur des méthodes pouvant limiter les venues d'eau et de sable. L'une des méthodes utilisée consiste à traiter le puits par une solution à base de polymère (Kohler *et al.*, 1993; Seright, 1993; Barreau, 1996; Nilsson *et al.*, 1998; Zaitoun *et al.*, 1999; Elmkies, 2001). Cette méthode a pour principaux avantages d'avoir un faible coût et d'être simple à mettre en oeuvre. Elle consiste à injecter la solution de polymère dans la zone réservoir, au voisinage du puits injecteur ou producteur. L'adsorption du polymère a pour conséquence de modifier les caractéristiques pétrophysiques du réservoir, en réduisant notablement

la perméabilité relative à l'eau de la roche, sans trop affecter la perméabilité à l'huile ou au gaz. Ce phénomène est appelé **réduction sélective de perméabilité à l'eau**, due à la présence d'une couche de polymère adsorbé.

Différentes hypothèses ont été avancées dans la littérature pour expliquer ce phénomène :

- effet de gonflement / contraction du polymère en présence d'eau ou d'huile (Mennella *et al.*, 1998);
- écoulements d'eau et d'huile dans des réseaux distincts de pores (Nilsson *et al.*, 1998);
- effet de l'amélioration de la mouillabilité de la roche à l'eau (Zaitoun et Kohler, 1989);
- encombrement stérique et réduction de la taille des pores (Barreau, 1996; Zheng *et al.*, 1998).

Certaines de ces hypothèses ont permis d'expliquer quelques propriétés de la couche de polymère sur des écoulements eau/huile et gaz/eau étudiés lors des deux thèses précédant le travail actuel (Barreau, 1996; Elmkies, 2001).

Ces thèses ont été le résultat d'une collaboration entre l'IFP et le TREFLE au cours des dix dernières années.

- *Patrick Barreau, 1996 : Modifications des propriétés polyphasiques d'un milieu poreux en présence d'une couche de polymère adsorbé : études expérimentale et numérique. Cette thèse avait pour objectif d'étudier l'influence d'une couche de polymère sur des écoulements eau/huile.*
- *Philippe Elmkies, 2001 : Modification des propriétés polyphasiques des roches après adsorption de polymère. Cette thèse avait pour but d'étudier l'influence de la mouillabilité des roches sur les propriétés d'écoulements eau/huile en présence d'une couche de polymère adsorbé. Une étude avait également été initiée sur les propriétés de modification d'une couche de polymère sur des écoulements gaz/eau.*

La totalité de ces trois thèses (Patrick Barreau, Philippe Elmkies et la présente) fait partie d'un travail global et cohérent, chaque étape permettant d'améliorer la connaissance et de confirmer certaines des hypothèses de la littérature sur des écoulements diphasiques eau/huile puis gaz/eau en présence d'une couche de polymère adsorbé.

Si l'utilisation d'une solution de polymère a été envisagée à l'origine pour l'amélioration de l'exploitation des puits à huile, GDF, avec le concours de l'IFP a récemment souhaité la transposer sur des puits d'extraction de gaz équipant des stockages en aquifère. En effet, lors du soutirage du gaz, des problèmes similaires (venues d'eau et de sable) à ceux qui surviennent lors de l'extraction des hydrocarbures sont observés et limitent l'exploitation et la rentabilité des puits.

Si la production de sable entraîne une dégradation des installations de surface et des équipements de puits (fort pouvoir abrasif du sable à débits élevés), la production d'eau, quant à elle, a deux conséquences majeures (Zaitoun *et al.*, 2002) :

- un sur-coût financier d'environ 80 € par m^3 (coût de l'incinération de l'eau produite).
- une fermeture prématurée des puits lorsque le niveau d'eau est trop élevé, en raison de la perte de productivité et des risques d'envoie élevés.

Les objectifs principaux de ce travail sont d'améliorer la connaissance de l'influence d'une couche de polymère sur la réduction sélective de perméabilité à l'eau dans le cas d'un écoulement gaz/eau, mais également sur les effets Klinkenberg et inertiels dans des milieux poreux modèles. Peu de résultats publiés sont disponibles dans la littérature concernant ces effets actuellement.

Le deuxième chapitre de ce document sera consacré aux écoulements polyphasiques en milieu poreux en présence de polymère. Après quelques définitions et généralités, un descriptif des écoulements monophasiques et diphasiques sera présenté.

Dans le troisième chapitre, quelques notions élémentaires sur les solutions de polymère et leur transport en milieu poreux seront décrites.

Dans le chapitre subséquent, sera abordé l'effet d'une couche de polymère adsorbé sur des écoulements diphasiques, ainsi que différents modèles de la littérature (permettant d'interpréter le phénomène de **réduction sélective de perméabilité** à l'eau dans des écoulements eau/huile et gaz/eau).

Pour améliorer les connaissances et la compréhension des phénomènes limitant les venues d'eau dues à la présence d'une couche de polymère, les résultats expérimentaux seront présentés dans le cinquième chapitre. Priorité sera donnée à la compréhension des phénomènes responsables de la réduction sélective de perméabilité à l'eau.

Ensuite dans les sixième et septième chapitres, seront exposés les résultats obtenus sur les **effets Klinkenberg et inertiels** pour des milieux poreux non-consolidés constitués de grains de SiC.

Enfin, les conclusions générales relatives à l'ensemble de cette étude seront exposées. Ces dernières reviendront sur les points importants énoncés à travers les différents chapitres. Il sera également fait état des perspectives s'inscrivant dans la continuité des expériences réalisées au cours de ces dernières années.

Chapitre 2

Écoulements en milieu poreux

La description et la modélisation d'écoulements monophasiques et polyphasiques en milieu poreux a suscité de nombreuses études. Celles-ci ont été motivées par un besoin de compréhension des ingénieurs des secteurs hydrologique et pétrolier. En effet, les aquifères et les roches-réservoirs des gisements contiennent généralement un ou plusieurs fluides (eau, huile et/ou gaz). Lors de la mise en exploitation d'un gisement, il est très fréquent qu'un fluide vienne déplacer l'hydrocarbure en place. Ce fluide peut provenir de la baisse du niveau d'hydrocarbure dans la roche-réservoir, ou être injecté. Les exemples sont multiples (Marle, 1972) :

- sous l'effet de la baisse de pression due à l'exploitation, il peut y avoir migration d'eau depuis les régions extérieures vers le gisement (appelé en anglais "water-drive") ;
- les gaz dissous dans l'huile ou l'eau peuvent être libérés lorsque la pression diminue et passe en dessous du point de bulle ;
- les techniques de récupération secondaire et tertiaire mettent en jeu l'injection d'un fluide initialement absent dans le réservoir, afin de déplacer l'huile vers le puits producteur.

L'objectif de cette partie est d'introduire les principales grandeurs physiques et les modèles qui décrivent les écoulements dans un milieu poreux. Il faut garder à l'esprit que les écoulements en milieu poreux peuvent être décrits à différentes échelles (FIG. 2.1) tel que présenté ci-dessous.

- **l'échelle du pore** de dimension microscopique a pour longueur caractéristique le diamètre de pores (typiquement entre $1\mu m$ et $100\mu m$) ;
- **l'échelle locale** est caractérisée par une dimension de l'ordre du cm. A cette échelle le milieu poreux est considéré comme continu et homogène, il est suffisamment petit pour prendre en compte la structure microscopique et suffisamment grand pour pouvoir en décrire le comportement global (notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER)). L'écoulement est alors régi par la loi de Darcy et ses extensions ;

- l'échelle du milieu poreux hétérogène ou grande échelle est celle donnée par la taille caractéristique des hétérogénéités. Les écoulements sont modélisés par des équations à grande échelle qui peuvent être obtenues par une prise de moyenne des équations à l'échelle locale (Quintard et Whitaker, 1988, 1990a,b).

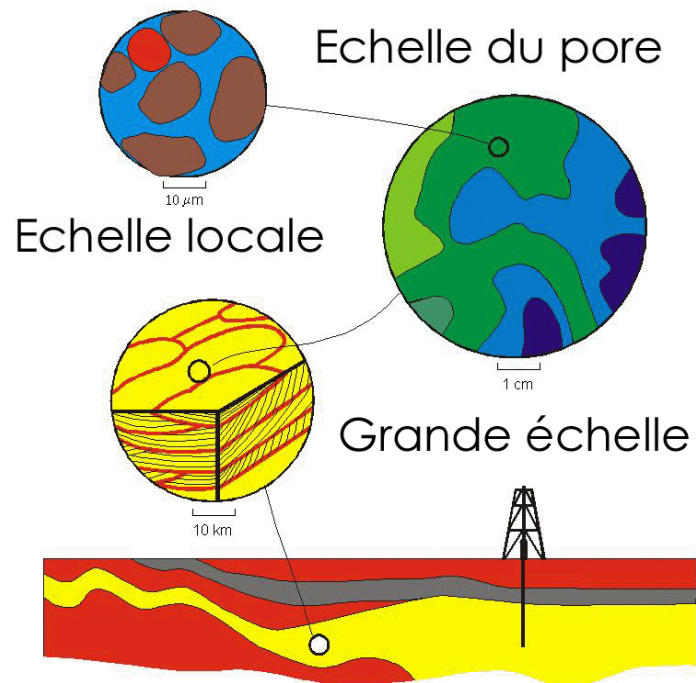


FIG. 2.1 – *Illustration des différentes échelles.*

S'il est clair que les écoulements dans un réservoir naturel devront prendre en compte l'effet des hétérogénéités, il est essentiel que les mécanismes fondamentaux soient bien caractérisés à l'échelle locale (échelle de Darcy). C'est pour cette raison que notre étude expérimentale se situe à cette échelle. Les phénomènes physiques à l'échelle du pore jouent aussi un rôle fondamental, ils seront donc rappelés dans leurs grandes lignes.

2.1 Définitions et généralités

Avant d'aborder en détail les lois régissant les écoulements aux échelles du pore et locale, il est important de bien définir le milieu poreux et la porosité.

Milieu Poreux

Un milieu poreux est un milieu continu, consolidé ou non, qui présente intérieurement une fraction de volume accessible à l'écoulement d'un fluide. Cette fraction de volume

“vide” se compose d’un système de pores interconnectés par des canaux de sections variables.

La figure (2.2) illustre les trois grandes catégories de milieux poreux :

- les **milieux fibreux** : filtres, etc. ;
- les **milieux consolidés** : les grès, les argiles, les granites, etc. ;
- les **milieux non-consolidés** : les sables, les graviers.

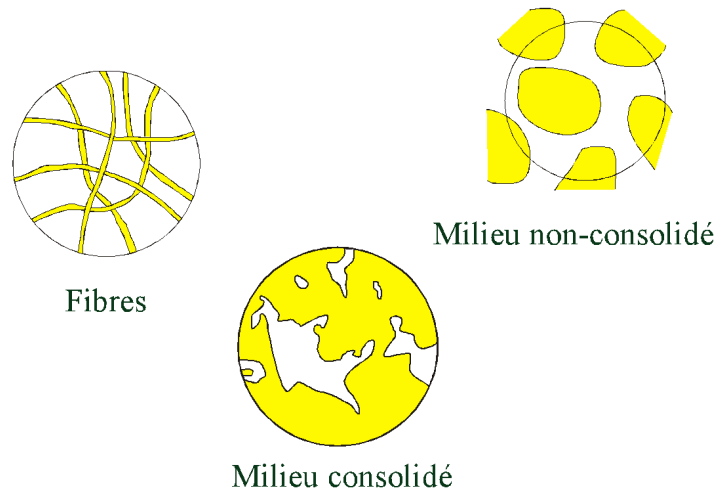


FIG. 2.2 – Illustration des grandes catégories de milieu poreux.

Plusieurs grandeurs physiques sont généralement définies pour caractériser les milieux poreux :

- **la granulométrie** qui consiste en l’étude de la répartition des éléments selon leur taille (milieux non consolidés). Elle se détermine par diffraction de la lumière (10 nm à 1 μm), par sédimentation (10 nm à 300 μm), ou par corrélation de photons (2 nm à 500 μm). L’analyse d’image est également employée particulièrement pour les particules non-sphériques. Dans le cas du Carbone de Silicium SiC , qui sera utilisé par la suite, cette distribution est très étroite et les milieux poreux sont considérés comme monodisperses.
- **la distribution de la taille des pores** est mesurée par analyse photographique et porosimétrie (Hg , N_2 , etc.);
- **la surface spécifique** (ou aire massique) représente la surface totale par unité de masse du produit accessible aux molécules de l’espèce utilisé pour réaliser la mesure. En effet, cette quantité est déterminée par adsorption de gaz à basse température. Les méthodes couramment utilisées sont basées sur les travaux de Brunauer, Emmett et Teller, plus connus sous les initiales BET.

Porosité

La porosité ϕ est définie pour un milieu poreux constitué d'une phase solide σ et d'une phase fluide β par :

$$\phi = \frac{V_\beta}{V_\sigma + V_\beta} \quad (2.1)$$

où V_β et V_σ sont respectivement les volumes des phases fluide β et solide σ .

En notant V_T le volume total et V_P le volume de pores du milieu poreux, la porosité peut s'écrire sous la forme :

$$\phi = \frac{V_P}{V_T} \quad (2.2)$$

La porosité est la grandeur physique à partir de laquelle est évaluée la capacité d'un milieu poreux à contenir une certaine quantité de fluide.

2.2 Écoulements monophasiques

2.2.1 Équations générales à l'échelle du pore

Équations de Navier-Stokes

Soit un milieu, constitué d'une phase solide σ , dans lequel s'écoule un fluide β . A l'échelle du pore l'écoulement d'une phase fluide newtonienne incompressible est décrit par l'équation de Navier-Stokes (conservation de la quantité de mouvement) :

$$-\nabla P_\beta + \rho_\beta \mathbf{g} + \mu_\beta \Delta \mathbf{v}_\beta = \rho_\beta \frac{d\mathbf{v}_\beta}{dt} \quad \text{dans } \Omega_\beta \quad (2.3)$$

où ρ_β , μ_β , P_β et \mathbf{v}_β sont respectivement la masse volumique, la viscosité dynamique, la pression et la vitesse de la phase fluide β , \mathbf{g} est l'accélération de la pesanteur, Ω_β désigne le domaine occupé par la phase β .

La condition à la limite est une vitesse relative nulle du fluide à la paroi : nullité des composantes tangentielle et normale. Les équations de Navier-Stokes étant du second ordre, cette condition d'adhérence est suffisante.

2.2.2 Nombres de Reynolds et de Knudsen

Nombre de Reynolds

Osborne Reynolds fit s'écouler des fluides de viscosités variables dans des canalisations de diamètres différents. Il détermina à partir de ces résultats qu'il existait un paramètre adimensionnel permettant de savoir si un écoulement était laminaire ou turbulent (Reynolds, 1883; Happel et Brenner, 1991).

Le nombre de Reynolds se définit comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il s'écrit sous la forme :

$$Re = \frac{\rho_{\beta} v_{\beta} D}{\mu_{\beta}} \quad (2.4)$$

où ρ_{β} est la masse volumique du fluide β , v_{β} sa vitesse moyenne, μ_{β} sa viscosité dynamique et D le diamètre du tube dans lequel s'écoule le fluide.

Dans le cas d'écoulements en milieu poreux de section S , le nombre de Reynolds de pores peut s'écrire sous la forme :

$$Re = \frac{Q d_g \rho_{\beta}}{S \phi \mu_{\beta}} \quad (2.5)$$

où d_g est le diamètre de grain, Q le débit volume et ϕ la porosité du milieu.

Nombre de Knudsen

Pour des écoulements de gaz ayant lieu à pressions moyennes faibles ou dans des pores de petites tailles, la grandeur physique caractéristique est le libre parcours moyen des molécules de gaz, λ , qui peut être calculé par la théorie cinétique des gaz :

$$\lambda = \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \quad (2.6)$$

où μ est la viscosité dynamique, P la pression, R la constante des gaz parfaits, T la température et M la masse molaire.

Le nombre de Knudsen, grandeur adimensionnelle, est défini par entre le libre parcours moyen des molécules, λ et le diamètre de pore, d_p .

$$K_n = \frac{\lambda}{d_p} \quad (2.7)$$

Le flux de particules à l'intérieur d'un milieu poreux est la somme des flux visqueux et effusif. L'écoulement sera dit continu lorsque les collisions particule/particule (flux visqueux) sont dominantes par rapport aux collisions particule/paroi (résultant de la diffusion moléculaire) qui constituent le flux effusif. Un écoulement est dit moléculaire lorsque le flux effusif est dominant par rapport au flux visqueux (Knudsen, 1950; Carman, 1956; Skjetne et Auriault, 1999).

La valeur du nombre de Knudsen caractérise le type d'écoulement observé (FIG. 2.3).

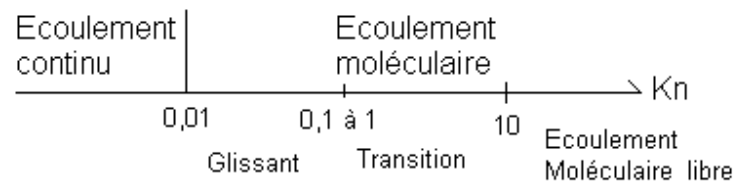


FIG. 2.3 – Type d'écoulement en fonction du nombre de Knudsen.

2.2.3 Modèle de Stokes

Le modèle physique utilisé pour décrire l'écoulement laminaire, non inertiel, d'un fluide newtonien incompressible est constitué de l'équation de conservation de la masse

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_\beta = 0 \quad \text{dans } \Omega_\beta \quad (2.8)$$

et de l'équation de Stokes qui est obtenue par linéarisation de l'équation de Navier-Stokes (2.3) :

$$-\nabla P_\beta + \rho_\beta \cdot \mathbf{g} + \mu_\beta \nabla^2 \mathbf{v}_\beta = 0 \quad \text{dans } \Omega_\beta \quad (2.9)$$

2.2.4 Changement d'échelle

Il a été vu précédemment que les écoulements fluides sont modélisés de manière rigoureuse et précise à l'échelle du pore. Cependant, dans notre étude, on s'intéresse à des phénomènes physiques que l'on souhaite modéliser à l'échelle locale. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer un changement d'échelle.

La prise de moyenne volumique est un outil qui permet d'effectuer ce changement d'échelle. La description présente ne précise pas les détails de cette méthode qui peuvent être trouvés dans la littérature (Quintard et Whitaker, 1988). Il faut cependant retenir que le modèle de Darcy peut être obtenu rigoureusement à partir des équations de Stokes (2.9). Dans le cas d'un écoulement inertiel, le modèle de Darcy-Forchheimer, qui sera décrit plus loin, est obtenu, moyennant certaines hypothèses, par la prise de moyenne des équations de Navier-Stokes (2.3).

La moyenne superficielle d'une grandeur physique, Ψ_β associée à la phase β , est définie par :

$$\langle \Psi_\beta \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_\beta} \Psi_\beta dV \quad (2.10)$$

où V_β est le volume de la phase β contenu dans le volume de prise de moyenne V .

La moyenne intrinsèque de phase est définie par :

$$\langle \Psi_\beta \rangle^\beta = \frac{1}{V_\beta} \int_{V_\beta} \Psi_\beta dV \quad (2.11)$$

reliée à la moyenne de phase grâce à :

$$\langle \Psi_\beta \rangle = \varepsilon_\beta \langle \Psi_\beta \rangle^\beta \quad (2.12)$$

où ε_β est la fraction volumique de la phase β (dans le cas monophasique $\varepsilon_\beta = \varepsilon$), définie par :

$$\varepsilon_\beta = \frac{V_\beta}{V} \quad (2.13)$$

En appliquant l'équation de Stokes et la conservation de la masse (2.8) pour des écoulements monophasiques, il est possible de retrouver la loi de Darcy sous la forme :

$$\langle \mathbf{v}_\beta \rangle = -\frac{\mathbf{K}}{\mu_\beta} \cdot (\nabla \langle P_\beta \rangle^\beta - \rho_\beta \mathbf{g}) \quad (2.14)$$

où \mathbf{K} est le tenseur de perméabilité.

Dans des milieux poreux anisotropes, la perméabilité dépend généralement de la direction de l'écoulement. Dans les gisements, la perméabilité horizontale est très souvent supérieure à la perméabilité verticale en raison de la présence de strates. Pour un milieu poreux isotrope, le tenseur de perméabilité s'exprime en fonction du coefficient de perméabilité intrinsèque ou absolue, k :

$$\mathbf{K} = k\mathbf{I} \quad (2.15)$$

\mathbf{I} étant la tenseur identité.

2.2.5 Modèles décrivant les écoulements à l'échelle locale

Modèle de Darcy Incompressible (Re faible)

Dans le cas particulier d'un écoulement unidirectionnel, horizontal, en l'absence de gravité, l'équation (2.14) s'écrit sous la forme :

$$v_\beta = -\frac{k}{\mu_\beta} \frac{dP_\beta}{dx} \quad (2.16)$$

où v_β est la vitesse de Darcy, k , μ_β et P_β sont respectivement la perméabilité absolue du milieu, la viscosité dynamique et la pression de la phase fluide β et x la direction de l'écoulement.

En supposant le milieu de section S , de longueur L et en notant $P_{\beta 1}$ (respectivement $P_{\beta 2}$) la pression de la phase fluide β à l'entrée (respectivement à la sortie) du milieu et compte tenu de l'hypothèse d'incompressibilité, l'intégration de l'équation (2.16) donne :

$$\frac{Q_\beta}{S} = \frac{k}{\mu_\beta} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.17)$$

où Q_β est le débit volume de la phase fluide β et $\Delta P (= P_{\beta 1} - P_{\beta 2})$ la perte de charge.

Modèle de Forchheimer (fluide incompressible, Re élevé)

Lorsque le nombre de Reynolds (2.4) est élevé, ce qui peut être le cas à proximité des puits d'injection ou de soutirage d'un réservoir de stockage de gaz, les effets inertiels ne peuvent plus être négligés. Dans ce cas, une déviation par rapport au régime darcéen est observée. La relation $\nabla \langle P_\beta \rangle = f(\langle v_\beta \rangle)$ n'est plus une fonction linéaire.

Les premières études traitant de ce phénomène (Forchheimer, 1901; Muskat, 1937; Green et Duwez, 1951; Cornell et Katz, 1953) ont mis en évidence la possibilité de corriger la relation précédente en la remplaçant par une forme polynomiale :

$$\nabla \langle P_\beta \rangle = \mathbf{A}.v_\beta + \mathbf{B}.v_\beta^m \quad (2.18)$$

ou bien

$$\nabla \langle P_\beta \rangle = \mathbf{A}.v_\beta + \mathbf{B}.v_\beta^2 + \mathbf{C}.v_\beta^3 \quad (2.19)$$

La plupart des études expérimentales et numériques se sont limitées à un terme correctif quadratique (Chauveteau et Thirriot, 1967; Barrère, 1990; Firdaouss et Guermont, 1995). Bien qu'encore discutée, cette hypothèse est, en règle générale, admise. L'objectif des travaux précédents était d'étudier des effets inertiels faibles et forts dans des géométries simples et complexes. En parallèle, d'autres études théoriques ont été développées pour mieux comprendre les origines de ce phénomène, dans l'objectif d'améliorer des prédictions issues de simulations numériques (Mei et Auriault, 1991; Skjetne et Auriault, 1999).

Un modèle empirique est largement utilisé pour décrire l'effet inertiel à l'échelle locale. Ce modèle dit de Forchheimer, s'écrit sous la forme :

$$-\nabla P_\beta = \frac{\mu_\beta}{k} \mathbf{v}_\beta + \rho_\beta \beta \mathbf{v}_\beta |\mathbf{v}_\beta| \quad (2.20)$$

Par rapport à l'équation (2.16) où seules étaient prises en compte les forces visqueuses (par le terme $\frac{\mu_\beta}{k} \mathbf{v}_\beta$), l'équation (2.20) tient également compte des forces d'inertie (par le terme $\rho_\beta \beta \mathbf{v}_\beta |\mathbf{v}_\beta|$) où β est le coefficient de résistance inertielle, appelé encore coefficient d'écoulement non-darcéen. Plus β est élevé et plus les forces inertiels sont prédominantes sur les forces visqueuses.

De nouveau, pour un écoulement unidirectionnel horizontal, par intégration de l'équation (2.20) pour un milieu de section S et de longueur L , il est possible d'obtenir l'équation de Forchheimer à l'échelle locale (cas compressible) :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{Q_\beta}{S} \left(\frac{\mu_\beta}{k} + \rho_\beta \beta \frac{Q_\beta}{S} \right) \quad (2.21)$$

Modèle de Darcy Compressible (Re faible)

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide compressible β , à faibles vitesses, et en supposant que la phase fluide obéit à la loi d'état des gaz parfaits :

$$\rho_\beta = \frac{M}{RT} P_\beta \quad (2.22)$$

où M est la masse molaire du fluide, R la constante d'état des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$) et T la température du fluide, la vitesse de Darcy s'écrit alors sous la forme :

$$v_\beta = \frac{Q_{m\beta}}{\rho_\beta S} = \frac{RTQ_{m\beta}}{MP_\beta S} \quad (2.23)$$

où $Q_{m\beta}$ est le débit masse du fluide β .

A partir des équations (2.16) et (2.23), il est possible de déduire l'équation suivante :

$$\frac{\mu_\beta}{k} \frac{Q_{m\beta}}{S} dx = -\frac{M}{RT} P_\beta dP_\beta \quad (2.24)$$

L'intégration de l'équation (2.24), en supposant l'écoulement isotherme et μ_β constant, pour un milieu de longueur L , donne :

$$\frac{\mu_\beta}{k} \frac{Q_{m\beta}}{S} L = \frac{M}{RT} \left(\frac{P_{\beta 1}^2 - P_{\beta 2}^2}{2} \right) \quad (2.25)$$

Le débit masse $Q_{m\beta}$ peut s'exprimer en fonction du débit volume d'entrée $Q_{\beta 1}$ et de la pression d'entrée $P_{\beta 1}$:

$$Q_{m\beta} = \frac{M}{RT} P_{\beta 1} Q_{\beta 1} \quad (2.26)$$

Des équations (2.25) et (2.26), il est possible de retrouver le modèle de Darcy Compressible :

$$\frac{Q_{\beta 1}}{S} = \frac{k}{2\mu_\beta L} \frac{(P_{\beta 1}^2 - P_{\beta 2}^2)}{P_{\beta 1}} \quad (2.27)$$

Modèle de Darcy-Forchheimer (écoulement compressible, Re élevé)

Depuis l'expression de la vitesse de Darcy donnée par l'équation (2.23) et de l'équation de Forchheimer (2.20), il est possible de déduire le modèle de Darcy-Forchheimer pour l'écoulement d'un fluide compressible :

$$-\frac{M}{RT}P_\beta dP_\beta = \frac{\mu_\beta}{k} \frac{Q_{m\beta}}{S} dx + \beta \frac{Q_{m\beta}^2}{S^2} dx \quad (2.28)$$

Après intégration, toujours avec l'hypothèse $T = C^{te}$ et $\mu_\beta = C^{te}$, l'équation (2.28) devient :

$$\left(\frac{P_{\beta 1}^2 - P_{\beta 2}^2}{2\mu_\beta P_{\beta 1} \frac{Q_{\beta 1}}{S} L} \right) = \frac{\mu_\beta}{k} \frac{Q_{m\beta}}{S} L + \beta \frac{Q_{m\beta}^2}{S^2} L \quad (2.29)$$

laquelle peut s'écrire sous forme plus usuelle :

$$\left(\frac{P_{\beta 1}^2 - P_{\beta 2}^2}{2\mu_\beta P_{\beta 1} \frac{Q_{\beta 1}}{S} L} \right) = \frac{1}{k} + \beta P_{\beta 1} \frac{1}{\mu_\beta} \frac{M}{RT} \frac{Q_{\beta 1}}{S} \quad (2.30)$$

En posant : $Y_\beta = \frac{M(P_{\beta 1}^2 - P_{\beta 2}^2)}{2\mu_\beta RT L (\frac{Q_{\beta 1}}{S})}$ et $X_\beta = P_{\beta 1} \frac{1}{\mu_\beta} \frac{M}{RT} \frac{Q_{\beta 1}}{S}$, l'équation (2.30) s'écrit alors sous la forme :

$$Y_\beta = \frac{1}{k} + \beta X_\beta \quad (2.31)$$

En utilisant cette écriture, il est possible d'identifier aisément, à l'aide d'une représentation graphique dite de Forchheimer, la perméabilité absolue k (inverse de la valeur à l'origine de Y_β) et le coefficient de résistance inertielle β (coefficient directeur de la droite $Y_\beta = f(X_\beta)$), avec une nuance cependant sur laquelle nous reviendrons dans la suite.

En partant du modèle de Darcy-Forchheimer (2.30) et des hypothèses décrites ci-dessous, il est possible d'écrire (2.30) sous forme adimensionnelle. En effet, en considérant :

- deux régimes d'écoulement : darcéen et inertiel fort ;
- le milieu poreux homogène ;
- un écoulement unidirectionnel mais compressible ;
- le gaz parfait ;
- un nombre de reynolds défini comme dans (2.5) avec le diamètre de grain comme longueur caractéristique.

On obtient en effet :

$$\frac{k (P_1^2 - P_2^2).d_g}{d_g^2 2P_1\rho_1\left(\frac{Q_1}{S}\right)^2 L} = \frac{\mu}{\rho_1 \frac{Q_1}{S} d_g} + \frac{\beta k}{d_g} \quad (2.32)$$

En définissant les différents termes de l'équation (2.32) de la manière suivante :

$$\lambda_p = \frac{(P_1^2 - P_2^2).d_g}{2P_1\rho_1\left(\frac{Q_1}{S}\right)^2 L}$$

$$a^{-1} = \frac{k}{d_g^2}$$

$$\frac{1}{Re} = \frac{\mu}{\rho_1 \frac{Q_1}{S} d_g}$$

$$b = \frac{\beta k}{d_g}$$

L'équation (2.32) peut se réécrire sous forme adimensionnelle suivante :

$$\lambda_p Re = a(1 + bRe) \quad (2.33)$$

où λ_p , a et bRe sont respectivement le coefficient de perte de charge défini en mécanique des fluides, l'inverse du nombre de Darcy et le nombre de Forchheimer.

A partir de l'équation (2.33) il est possible de représenter les différents régimes d'écoulement et d'en déduire les nombres de Darcy et Forchheimer comme indiqué sur la figure (FIG. 2.4) :

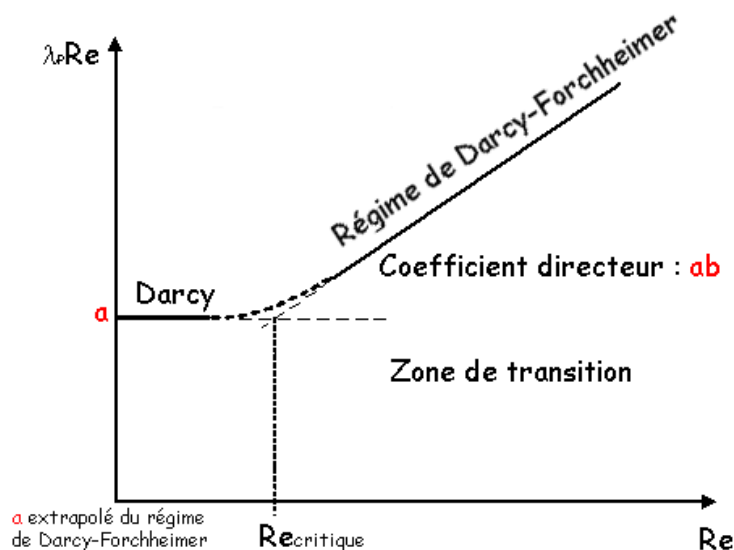


FIG. 2.4 – Représentation adimensionnelle des régimes d’écoulement en présence ou en absence d’effets inertiels.

La figure 2.4 montre que l’estimation de la valeur de la perméabilité d’un milieu poreux à partir du régime de Darcy-Forchheimer est surestimée. En effet, le nombre adimensionnel a est inversement proportionnel à k . C’est pour cette raison qu’il est souvent observé dans la littérature une différence entre les perméabilités déterminées à partir des modèles de Darcy et Darcy-Forchheimer.

Plusieurs études ont montré que dans de nombreux cas il était possible de corréliser la valeur de b à la géométrie du milieu poreux (Lindquist, 1933; Schneebeli, 1955; Chauveteau et Thirriot, 1967). Cette valeur est généralement comprise entre $1/80$ pour un milieu poreux constitué de billes de forme sphérique et $1/50$ lorsqu’il est composé de grains de sable anguleux.

2.3 Effet Klinkenberg

Dans un milieu poreux de perméabilité absolue relativement faible, il a souvent été observé que la perméabilité au gaz $k_g(P_m)$, où P_m est la pression moyenne dans le milieu tend vers la perméabilité absolue k à P_m élevée et croît quand P_m diminue. Ce phénomène est appelé effet Klinkenberg (Klinkenberg, 1941; Council, 1979; Herkelrath *et al.*, 1983; Satik et Horne, 1998; Kewen et Roland, 1999; Derek *et al.*, 2002). L’effet Klinkenberg apparaît lorsque le flux effusif devient significatif par rapport au flux visqueux. En d’autres termes, l’effet Klinkenberg est sensible pour des nombres de Knudsen supérieurs à 10^{-2} . En effet, dans ce cas les chocs particule/paroi deviennent non négligeables par rapport aux chocs particule/particule et à la diffusion moléculaire.

Dans de telles conditions, Klinkenberg a montré expérimentalement que la perméabilité au gaz pouvait s'écrire sous la forme suivante :

$$k_g(atm) = k_g(\infty) + \frac{C}{P_m} \quad (2.34)$$

où C est une constante, $k_g(\infty)$ la perméabilité au gaz corrigée de l'effet Klinkenberg et $P_m = (P_1 + P_2)/2$, la pression moyenne.

En utilisant le modèle de Darcy Compressible (2.25), il est possible d'écrire l'équation (2.34) sous la forme :

$$\frac{\mu L Q_1 P_1}{S \Delta P} = k_g(\infty) P_m + C \quad (2.35)$$

Cette expression du modèle de Klinkenberg permet de déterminer $k_g(\infty)$ et C directement à partir des données expérimentales brutes Q_1 , P_1 et ΔP .

Notons que $k_g(\infty)$ correspond à une valeur de perméabilité au gaz corrigée de l'effet Klinkenberg. En d'autres termes, sa valeur doit correspondre à la perméabilité absolue (à la saumure) du milieu, k_w .

Un milieu poreux peut être représenté de manière simplifiée par un faisceau de tubes capillaires. Le diamètre équivalent de ces tubes capillaires peut être exprimé de deux manières différentes : soit à partir de la perméabilité et de la porosité du milieu poreux :

$$d_e^{(k)} = 2\sqrt{\frac{8k_g(\infty)}{\phi}} \quad (2.36)$$

soit à partir de la constante de Klinkenberg :

$$d_e^{(C)} = \frac{4C}{\xi\phi\mu} \sqrt{\frac{2M}{\pi RT}} \quad (2.37)$$

où ξ , ϕ , μ , M , R et T sont respectivement un coefficient d'accomodation, la porosité du massif, la viscosité dynamique et la masse molaire du gaz, la constante des gaz parfaits et la température.

L'expression (2.37) se déduit par analogie entre le modèle de Poiseuille décrivant l'écoulement d'un fluide dans un tube capillaire **avec une condition de glissement à la paroi** et le modèle de Darcy Compressible décrivant l'écoulement d'un fluide en milieu poreux où la perméabilité du fluide est exprimée à l'aide de l'équation de Klinkenberg.

La comparaison des résultats obtenus par les deux équations (2.37) et (2.36) à partir des données expérimentales mesurées lors de chaque expérience permettra de s'assurer de la qualité des résultats présentés dans le chapitre 6.

2.4 Écoulements diphasiques

2.4.1 Équations générales

Description à l'échelle locale

Tout comme dans le cas monophasique, les équations de Stokes (2.9) associées à une équation de conservation de la masse régissent les écoulements polyphasiques (au minimum deux fluides incompressibles et non-miscibles 1 et 2) :

$$-\nabla \mathbf{P}_i + \rho_i \mathbf{g} + \mu_i \nabla^2 \mathbf{v}_i = 0 \quad (2.38)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_i = 0 \quad (2.39)$$

En notant σ la phase solide les trois conditions aux limites dans ce cas sont :

- $\mathbf{v}_i = 0$ à l'interface phase fluide - phase solide σ , pour $i = 1$ et 2 ;
- $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2$ à l'interface phase fluide 1 - phase fluide 2 ;
- $\mathbf{n} \cdot (\Sigma_1 - \Sigma_2) = \frac{\gamma}{\zeta} \mathbf{n}$, à l'interface phase fluide 1 - phase fluide 2
avec \mathbf{n} la normale unitaire à l'interface fluide - fluide.

La troisième condition à la limite exprime la différence de contraintes normales, à l'interface entre deux phases fluides, en fonction du rayon de courbure ζ de l'interface et de la tension interfaciale γ entre les deux phases fluides qui sera définie plus loin. Le tenseur des contraintes Σ_i (pour $i = 1$ et 2) associé à la phase i est défini par :

$$\Sigma_i = -P_i \mathbf{I} + \mu_i (\nabla \mathbf{v}_i + \nabla^t \mathbf{v}_i) \quad (2.40)$$

2.4.2 Tensions interfaciales - Forces capillaires

Les forces agissant à l'interface de deux fluides non-miscibles, d'un fluide et d'un solide ou au contact entre l'interface fluide-fluide et un solide se nomment forces de surface.

A l'intérieur d'un fluide, chaque molécule agit sur ses voisines et subit réciproquement une attraction ou une répulsion (cas d'ions) de la part de ces dernières. Après un certain temps, un état stationnaire est atteint dans lequel l'ensemble des molécules s'équilibre (les unes par rapport aux autres), sauf au voisinage de l'interface. L'interface fluide peut être l'objet de déformation telles qu'une extension, une flexion ou une contrainte (une compression, un cisaillement). Ce déséquilibre est à l'origine des forces de tension interfaciale pour des interfaces fluide-fluide. Les interfaces fluide-solide sont, quant à elles, à l'origine des forces d'adsorption ou de répulsion. La

tension interfaciale entre une substance et sa vapeur se nomme tension superficielle, elle traduit la tendance d'un volume liquide à minimiser l'étendue de sa surface de contact avec l'extérieur. Par exemple, la tension interfaciale diazote/eau (conditions de gisement) est de l'ordre 35.10^{-3} à $55.10^{-3} N.m^{-1}$.

Les phénomènes de surface ayant lieu à petite échelle sont appelés phénomènes capillaires. Si on considère le cas d'un tube capillaire, on observe, à l'interface entre deux phases non miscibles, une différence de pression qui s'exprime par la loi de Laplace :

$$P_1 - P_2 = \gamma \zeta \quad (2.41)$$

La figure ci-dessous illustre le phénomène précédemment décrit.

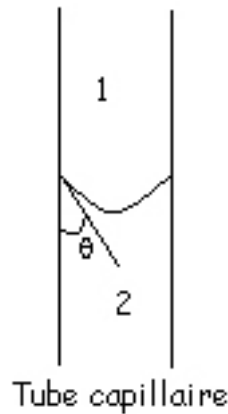


FIG. 2.5 – Représentation de deux phases non-miscibles 1 et 2 dans un tube capillaire.

où P_1 et P_2 sont respectivement les pressions dans les fluides 1 et 2 (par exemple : l'eau et l'huile). La courbure ζ est définie grâce aux rayons de courbures principaux, R et R' , au point considéré de l'interface par la relation (2.42) :

$$\zeta = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \quad (2.42)$$

Lorsque le rapport des forces de gravité et de tension interfaciale est faible, il est admis que dans un tube capillaire de petit diamètre l'interface est sphérique, ce qui permet d'écrire la relation de Laplace sous la forme :

$$P_1 - P_2 = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (2.43)$$

où r est le rayon du tube capillaire.

2.4.3 Pression capillaire

La différence de pression existant entre deux points infiniment voisins et situés de part et d'autre d'une interface à l'équilibre, délimitant un fluide non-mouillant d'un fluide mouillant, est appelée pression capillaire, notée P_c . La pression capillaire est donc l'accroissement de pression observé en passant du côté convexe (fluide 1 : non-mouillant) au côté concave (fluide 2 : mouillant) de l'interface :

$$P_c = P_2 - P_1 \quad (2.44)$$

Cette notion de pression capillaire est relativement complexe dans la mesure où elle met en jeu les principaux phénomènes observés à l'échelle microscopique tels que les forces de surface et la mouillabilité. A l'échelle du pore, les forces capillaires sont généralement dominantes sur les forces gravitaires. La distribution des fluides à cette échelle est donc principalement contrôlée par les forces capillaires. Le fluide mouillant tend à remplir les pores les plus fins tandis que le fluide non-mouillant tend à remplir les pores les plus gros. La pression capillaire est proportionnelle à la tension interfaciale et est inversement proportionnelle à la taille des rayons de pore.

Dans le cas d'un tube capillaire de rayon r contenant de l'huile et de l'eau, l'application des équations (2.43) et (2.44) permet d'obtenir la relation :

$$P_c = P_o - P_w = \frac{2\gamma_{o,w} \cos \theta}{r} \quad (2.45)$$

où $\gamma_{o,w}$ est la tension interfaciale eau/huile et θ l'angle de mouillage. D'après l'équation (2.45), dans le cas d'un mouillage parfait, la pression capillaire sera d'autant plus faible que le rayon r du tube capillaire sera élevé. Si le milieu poreux est modélisé par un ensemble de tubes capillaires, sa perméabilité sera alors proportionnelle à r^2 , et la pression capillaire sera donc inversement proportionnelle à \sqrt{k} . La pression capillaire d'un milieu poreux sera, par conséquent, d'autant plus élevée que la perméabilité du milieu sera faible.

2.4.4 Mouillabilité

La mouillabilité est la capacité d'un liquide à recouvrir une surface solide ou un autre liquide. L'angle caractéristique définissant la mouillabilité d'un fluide est nommé angle de contact (angle de raccordement ou encore angle de mouillage) et noté θ . Cet angle est mesuré à l'intérieur de l'un ou l'autre des deux fluides en présence (FIG. 2.6).

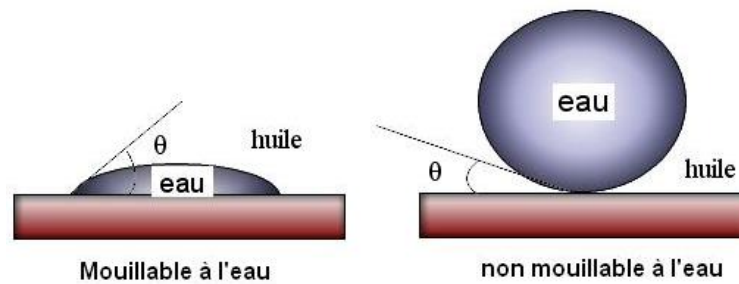


FIG. 2.6 – Exemple de mouillage d'un solide par un liquide.

D'un point de vue qualitatif, la définition de la mouillabilité est la suivante : si une surface est en contact avec deux fluides séparés par une interface, cette surface est d'autant plus mouillable à l'un de ces fluides que l'angle de contact est proche de zéro. Toutefois, l'angle de contact n'a pas une valeur fixe et celle-ci dépend du processus de mise en place des fluides et des propriétés de la paroi solide. Elle diffère également selon que les fluides sont statiques ou mobiles.

On notera que si les propriétés de mouillage ou de mouillabilité sont bien définies à l'échelle de la surface (échelle du pore), la mouillabilité d'un milieu poreux qui est une propriété macroscopique, est évaluée par différentes méthodes expérimentales (test Amott, USBM, etc.).

Un milieu poreux sera dit mouillable à un fluide si ce fluide tend à déplacer spontanément un autre fluide initialement présent. Les milieux constitués de minéraux tels que la silice, sont généralement mouillables à l'eau. Cependant, certaines roches peuvent être préférentiellement mouillables à l'huile, notamment pour certains calcaires. Dans le cas des gisements pétroliers, il est possible de trouver des roches dans un état de mouillabilité mixte, où une partie de la roche sera préférentiellement mouillable à l'eau, alors que le reste le sera à l'huile. Cela est principalement dû au fait que les roches-réservoirs sont constituées de minéraux ayant des mouillabilités très différentes. Il est possible qu'une roche mouillable initialement à l'eau ne le soit plus après passage d'un liquide complexe comme une huile de gisement.

La connaissance exacte de la mouillabilité des milieux poreux utilisés est essentielle pour avoir une idée de la répartition des fluides à l'échelle microscopique. La mouillabilité a une influence importante sur les écoulements polyphasiques.

A partir de la notion de mouillabilité, les notions d'imbibition et de drainage peuvent être définies. Par définition, l'imbibition est le déplacement d'un fluide non-mouillant par un fluide mouillant. Inversement, le drainage est le déplacement d'un fluide mouillant par un fluide non-mouillant.

2.4.5 Loi de Darcy Généralisée

La prise de moyenne du système d'équations (2.10) à (2.12) permet d'écrire, moyennant certaines hypothèses simplificatrices, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement à l'échelle locale pour chacune des phases. Pour la quantité de mouvement on obtient (Whitaker, 1986; Lasseux *et al.*, 1996; Zabaras et Samanta, 2004) :

$$\langle \mathbf{v}_1 \rangle = -\frac{\mathbf{K}_{11}^*}{\mu_1} \cdot (\nabla \langle P_1 \rangle^{\beta_1} - \rho_1 \mathbf{g}) - \frac{-\mathbf{K}_{21}^*}{\mu_2} \cdot (\nabla \langle P_2 \rangle^{\beta_2} - \rho_2 \mathbf{g}) \quad (2.46)$$

$$\langle \mathbf{v}_2 \rangle = -\frac{\mathbf{K}_{22}^*}{\mu_2} \cdot (\nabla \langle P_2 \rangle^{\beta_2} - \rho_2 \mathbf{g}) - \frac{-\mathbf{K}_{12}^*}{\mu_1} \cdot (\nabla \langle P_1 \rangle^{\beta_1} - \rho_1 \mathbf{g}) \quad (2.47)$$

Dans l'équation (2.46) (respectivement (2.47)), le tenseur \mathbf{K}_{11}^* (respectivement \mathbf{K}_{22}^*) est le tenseur de perméabilité effective de la phase fluide 1 (respectivement 2). Les tenseurs \mathbf{K}_{12}^* et \mathbf{K}_{21}^* sont les tenseurs de couplage rendant compte des échanges de quantité de mouvement entre les phases au travers des interfaces 1/2 .

Dans la pratique, le système d'équations précédent est peu utilisé à cause de la difficulté d'estimation des termes de couplage. De plus, des résultats expérimentaux (Zarcone et Lenormand, 1994) tendent à montrer que ces termes sont négligeables pour des écoulements diphasiques en milieu poreux. En négligeant ces termes, il est possible d'obtenir la loi de Darcy Généralisée :

$$\langle \mathbf{v}_i \rangle = -\frac{\mathbf{K}_i^*}{\mu_i} \cdot (\nabla \langle P_i \rangle^i - \rho_i \mathbf{g}) \quad (2.48)$$

où \mathbf{K}_i^* est le tenseur de perméabilité de la phase fluide i .

2.4.6 Saturation

La saturation S_β d'une phase fluide β est définie par la proportion du volume de pores occupé par cette phase :

$$S_\beta = \frac{V_\beta}{V_P} \quad (2.49)$$

où V_β et V_P sont respectivement le volume de la phase fluide β et le volume de pores.

Pour un milieu poreux saturé (en écoulement diphasique) la somme des saturations des phases fluides est égale à 1.

Lors d'un drainage, la saturation en eau obtenue en fin de déplacement est appelée saturation irréductible et notée $S_{\beta i}$.

2.4.7 Perméabilité effective (écoulements gaz/eau)

La perméabilité effective au gaz $k_g(P_2, S_w)$ est définie comme étant la perméabilité au gaz d'un milieu poreux contenant une saturation en eau S_w et mesurée à une pression de sortie P_2 . Elle se détermine de la même façon que la perméabilité au gaz lorsque la saturation en eau est nulle.

La perméabilité effective au gaz dépend principalement de la valeur de la saturation en eau. Plus cette dernière est importante, plus la valeur de la perméabilité effective au gaz sera diminuée par rapport à la perméabilité initiale au gaz obtenue à saturation en eau nulle.

2.4.8 Perméabilité relative

Lors d'un écoulement diphasique unidimensionnel dans un milieu homogène et isotrope, la perméabilité relative au gaz, k_{rg} , d'un milieu poreux est définie à l'aide de la perméabilité effective du milieu, $k_g(S_w)$, et de la perméabilité absolue ou à la saumure, k_w , de la manière suivante :

$$k_{rg} = \frac{k_g(S_w)}{k_w} \quad (2.50)$$

Pour un couple de fluide eau-gaz, où l'eau est le fluide mouillant, l'aspect des courbes de perméabilités relatives, en fonction de la saturation en fluide mouillant, est représentée en figure (2.7). Ces courbes sont obtenues expérimentalement pour un échantillon saturé en eau, en présence de gaz, dans lequel on injecte graduellement un débit de gaz de plus en plus élevé, correspondant à une suite d'écoulements permanents diphasiques.

On observe alors que la perméabilité au gaz augmente au fur et à mesure que la saturation en eau diminue dans le milieu, jusqu'à une valeur maximale atteinte pour une saturation irréductible d'eau. Lorsque l'eau est la phase mouillante, on note que la perméabilité, k_{rg} , à la saturation irréductible en eau, est nettement supérieure à la perméabilité k_{rw} à la saturation résiduelle en gaz. Cela signifie que la présence d'eau irréductible gêne peu l'écoulement de gaz, alors que la présence de gaz gêne d'avantage l'écoulement d'eau. Le fait que l'écoulement soit diphasique réduit en général la capacité totale de l'écoulement à travers le milieu.

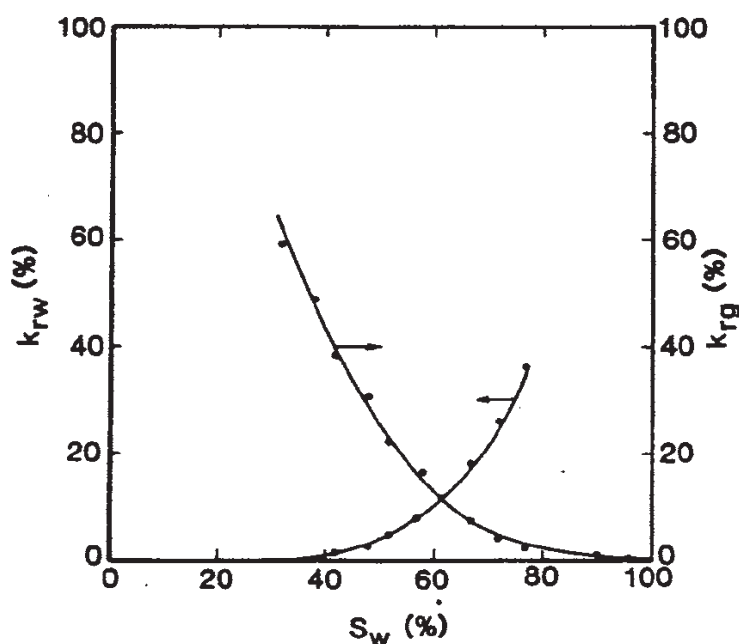


FIG. 2.7 – *Perméabilités relatives pour un écoulement diphasique gaz/eau (Ertekin et al., 1986).*

2.5 Conclusions

Plusieurs échelles d'observation existent pour l'étude d'écoulements au travers de milieux poreux : l'échelle du pore, l'échelle de la carotte et du réservoir. Par conséquent, les lois régissant les écoulements dépendent de l'échelle d'étude. Ainsi aux dimensions du pore ce sont les équations de Stokes et Navier-Stokes qui décrivent les écoulements, alors qu'à l'échelle de la carotte c'est le modèle de Darcy et ses extensions qui s'appliquent.

Plusieurs études ont montré qu'il était possible de retrouver les lois régissant les écoulements à l'échelle locale à partir de celles de l'échelle du pore par des méthodes de changement d'échelle (prise de moyenne volumique ou homogénéisation). Si la solution pour passer des équations de Stokes au modèle de Darcy est parfaitement connue, celle pour retrouver le modèle de Darcy-Forchheimer à partir des équations de Navier-Stokes ne l'est pas encore totalement.

Les modèles de Darcy et de Forchheimer sont utilisés pour décrire des écoulements à l'échelle locale. L'utilisation de ces modèles dépend de deux paramètres : la valeur du nombre de Reynolds (rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses) et le type de fluide (compressible ou incompressible).

En configuration monophasique, la loi de Darcy ne s'applique que pour des écoulements rampants non raréfiés. Aux limites du modèle de Darcy, il est nécessaire de

tenir compte des effets inertiels ou de Klinkenberg. Les modèles alors utilisés sont ceux de Darcy-Forchheimer et de Klinkenberg.

En configuration polyphasique, la répartition des phases à l'échelle du pore ainsi que les écoulements dépendent de plusieurs grandeurs physiques : la tension interfaciale, les forces capillaires et la mouillabilité mais aussi la saturation et les viscosités. La température et la pression (cas des fluides compressibles) peuvent aussi jouer un rôle déterminant.

Chapitre 3

Solutions de polymère

3.1 Définitions et généralités

Un polymère est composé d'une succession d'unités monomères identiques qui se répètent un grand nombre de fois.

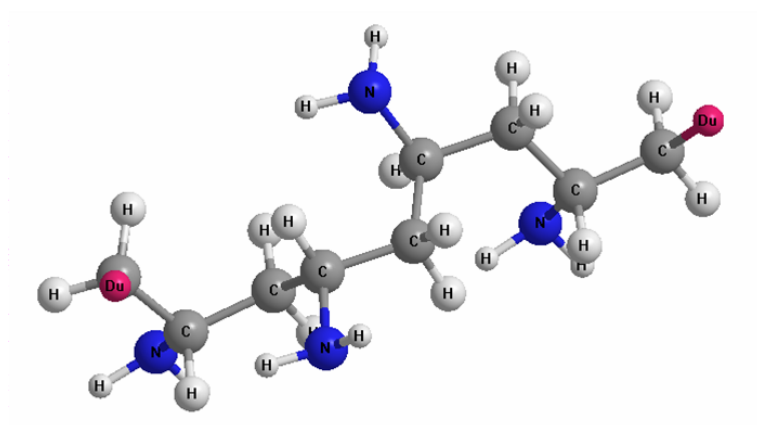


FIG. 3.1 – Représentation d'une molécule de polyacrylamide.

Un polymère est composé d'un squelette, de groupements latéraux et terminaux. Il est dit linéaire lorsqu'il se compose uniquement d'une chaîne de monomères. La figure 3.1 est une représentation du polyacrylamide neutre utilisé lors des expériences présentées dans les chapitres 5 et 6. Ce type de macromolécule est généralement représenté sous forme semi-développée :

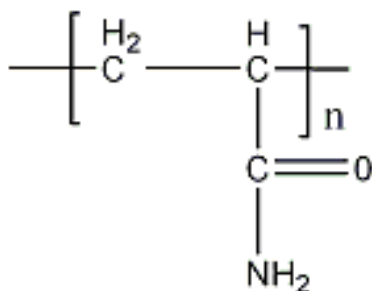


FIG. 3.2 – Représentation semi-développée du polyacrylamide.

où l'indice n représente le nombre de monomères $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$ se répétant. Cette famille de polymère est nommée homopolymère. A l'inverse, un copolymère se compose de plusieurs blocs de monomères différents se répétant de façon alternée, par exemple :

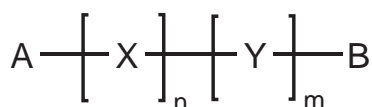


FIG. 3.3 – Représentation d'un copolymère.

où A et B sont les groupements terminaux, X et Y deux monomères, n et m les indices représentant respectivement le nombre de monomères X et Y se répétant entre A et B. Ce type de molécule peut être obtenu à partir d'une réaction chimique entre deux homopolymères.

Il existe également des polymères plus complexes, tels que des polymères ramifiés et réticulés, dont les éléments sont des segments de polymères. Une molécule possédant un point central à partir duquel s'étendent différents segments de polymères, est dite "en étoile" (FIG. 3.4a). Si ces segments de polymère partent de monomères, constituant eux-mêmes une chaîne linéaire, ce type de polymère est dit "en peigne" (FIG. 3.4b). Les polymères réticulés sont obtenus à partir de plusieurs chaînes de polymère. Le cas le plus simple est celui de chaînes contenant des doubles liaisons, à partir desquelles il est possible de former, sous certaines conditions, des liaisons interpolymériques. Des agents réticulants peuvent également être utilisés pour agir sur certaines fonctions dans le but de former ces liaisons. La réticulation peut être souhaitée (exemple : sulfuration pour les pneus) ou bien se faire naturellement sous l'effet de la dégradation des chaînes de polymère sous l'effet des UV ou de la chaleur. Ce type de réticulation non-souhaitée définit la dégradation.

Ces réactions de pontage intermoléculaire (réticulation) sont extrêmement importantes, car elles influent directement sur les propriétés physiques des polymères. Elles accroissent la masse moléculaire et diminuent la mobilité des chaînes de polymère. Deux conséquences directes découlant de cette réaction sont la diminution des

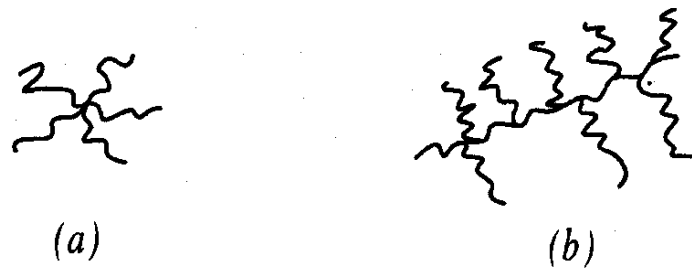


FIG. 3.4 – *Polymères branchés : (a) polymère en étoile - (b) polymère en peigne.*

propriétés mécaniques et la diminution de la solubilité des chaînes de polymère. Un gel est quant à lui constitué de chaînes de polymère très peu réticulées les unes aux autres. Ce taux de réticulation faible lui permet de rester sensible aux solvants ; il peut, par exemple, gonfler, c'est-à-dire fixer une proportion variable de solvant. Ce type de phénomène confère des propriétés particulières aux gels.

3.2 Polymérisation et masse moléculaire

3.2.1 Polymérisation

La synthèse d'un polymère se fait par polymérisation (réaction en chaîne) de monomères réactifs (comportant des liaisons doubles ou triples) entre eux. Une réaction de polymérisation se divise en trois étapes principales :

- **initiation** : à l'aide d'un initiateur, tel qu'un catalyseur (en faible quantité), un ou plusieurs sites actifs (radicaux, ions) sont créés sur quelques monomères ;
- **propagation** : les monomères actifs vont réagir avec d'autres monomères pour former pas à pas des chaînes de polymère ;
- **terminaison** : les chaînes de polymère actives vont commencer à réagir entre elles pour donner des chaînes qui deviendront inactives.

Les principaux types de polymérisation existants sont : radicalaire, cationique et anionique. Dans les deux derniers cas, la polymérisation est initiée par des amorceurs acides ou électrophiles (ouvrant des doubles liaisons) et par des attaques directes d'anions (ou de bases) ou encore par transfert d'un électron à partir d'un donneur actif (Beylen *et al.*, 1997).

3.2.2 Masse moléculaire

Dans une poudre de polyacrylamide, chaque grain est composé de chaînes polymériques de longueurs différentes (conséquence directe des procédés de fabrication).

De ce fait, deux types de masse moléculaire moyenne sont définies et peuvent être déterminées expérimentalement : la masse moléculaire moyenne en nombre \overline{M}_n , et la masse moléculaire moyenne en masse \overline{M}_p définies par :

$$\overline{M}_n = \frac{\sum_i M_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (3.1)$$

$$\overline{M}_p = \frac{\sum_i M_i^2 N_i}{\sum_i M_i N_i} \quad (3.2)$$

où N_i est la concentration molaire en chaîne polymérique, dans un mélange ou en solution, ayant une masse moléculaire M_i .

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère dépendent étroitement des espèces qui le composent et de sa masse moléculaire moyenne. En jouant sur ces paramètres, il est possible d'obtenir des élastomères (souples avec des fibres très résistantes) ou bien des films très durs. Les propriétés physiques d'un polymère dépendent principalement des monomères qui le composent (réactivité, solubilité...) ainsi que des interactions interpolymériques. Un polymère est composé de plusieurs chaînes polymériques, chaque "polymère" possède alors un indice de polydispersité, notée I :

$$I = \overline{M}_p / \overline{M}_n \quad (3.3)$$

3.3 Rayon de giration

L'un des paramètres les plus simples pour connaître l'encombrement stérique d'une macromolécule en solution est son rayon de giration R_G .

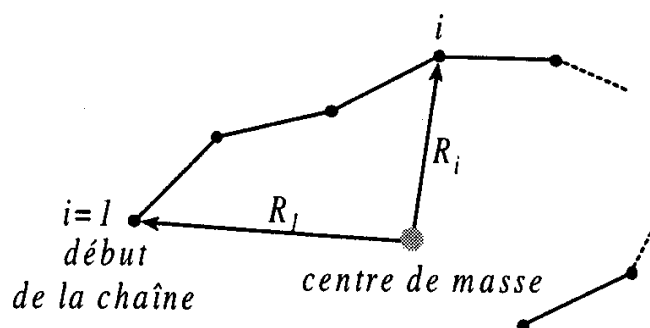


FIG. 3.5 – Rayon de giration.

Soit une chaîne polymérique formée de N maillons ($1 \leq i \leq N$), chacun d'entre eux ayant une masse m_i (FIG. 3.5). Le rayon de giration R_G est défini par la relation (3.4) :

$$M.R_G^2 = \sum_{i=1}^N m_i.R_i^2 \quad (3.4)$$

où

$$M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3.5)$$

R_G a donc pour expression

$$R_G^2 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i.R_i^2}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (3.6)$$

Pour une macromolécule ayant des segments égaux, $R_i = C^{te}$, il est possible de simplifier l'équation (3.6) pour obtenir :

$$R_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i^2 \quad (3.7)$$

3.4 Polymères en solution

3.4.1 Solvant

Le degré de dissolution des macromolécules dans un solvant quelconque dépend de la nature et de l'intensité des interactions soluté/solvant et soluté/soluté. Dans le cas de **bons solvants**, l'intensité des interactions soluté/solvant est importante, les segments de polymère ont tendance à s'entourer de molécules de solvant. Dans cette configuration, les macromolécules ont tendance à gonfler. Dans le cas de **mauvais solvants**, l'intensité des interactions soluté/soluté est cette fois-ci plus importante que celles soluté/solvant, les molécules de polymère tendent alors à se replier sur elles mêmes en éliminant les molécules de solvant qui l'entourent. Dans cette configuration, les macromolécules ont tendance à former des agrégats pour minimiser les interactions entre les segments de polymère et les molécules de solvant.

En thermodynamique, la théorie de Flory et Huggins (Flory, 1953; Sebille, 1972) est largement utilisée pour prévoir le comportement macroscopique d'un polymère vis-à-vis d'un solvant à l'aide du paramètre d'interaction, χ_{12} , lequel est intimement lié

à la température. Pour des macromolécules de haut poids moléculaire, les conditions critiques de dissolution sont définies pour une valeur critique $(\chi_{12})_C$ égale à $1/2$. A une température donnée, un solvant sera donc considéré comme “bon” lorsque la valeur de χ_{12} est assez éloignée des conditions critiques ($\chi_{12} < 0,30 - 0,35$, par exemple). Parallèlement, les “mauvais solvants” d’un polymère sont caractérisés par des valeurs de χ_{12} proches des conditions critiques ($0,40 - 0,50$) ou supérieures (non solvant ou précipitation).

Les notions de “bon” ou “mauvais” solvant sont étroitement liées à la température. Les mélanges étant supposés endothermiques ($\Delta H_M > 0$), un abaissement de la température a pour conséquence de rendre un solvant donné de plus en plus mauvais, d’un point de vue thermodynamique, pour aboutir à une démixion surnageant/coacervat.

A une température donnée, le “solvant Θ ” est défini lorsque la valeur χ_{12} est égale à $1/2$. Dans les conditions Θ , les chaînes de polymère peuvent s’interpénétrer, ce qui constitue le stade limite entre la solubilité ($\chi_{12} < 0,5$) et la précipitation ($\chi_{12} > 0,5$).

3.5 Propriétés rhéologiques

Les propriétés rhéologiques des solutions de polymère dépendent fortement du type d’écoulement auxquelles elles sont soumises :

- **écoulement en cisaillement** : le gradient de vitesse est perpendiculaire à l’écoulement ;
- **écoulement élongationnel** : le gradient de vitesse est parallèle à l’écoulement ;
- **écoulement complexe** : le gradient de vitesse a des composantes non nulles dans les deux directions (parallèle et perpendiculaire à l’écoulement).

3.5.1 Rhéologie des solutions de polymère hors milieu poreux

Lors d’un écoulement isotherme, la contrainte de cisaillement τ appliquée entre deux couches de fluide est définie, de manière générale, par :

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (3.8)$$

où μ dépend du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$.

Un fluide est dit newtonien lorsque sa contrainte de cisaillement varie linéairement avec le taux de cisaillement, c’est-à-dire lorsque sa viscosité dynamique reste constante quel que soit le taux de cisaillement appliqué. L’équation (3.8) s’écrit alors sous la forme :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (3.9)$$

où μ est la viscosité dynamique de la solution.

La figure (3.6) illustre, pour différentes concentrations, le comportement rhéologique d'une solution de polymère (fluide rhéofluidifiant) :

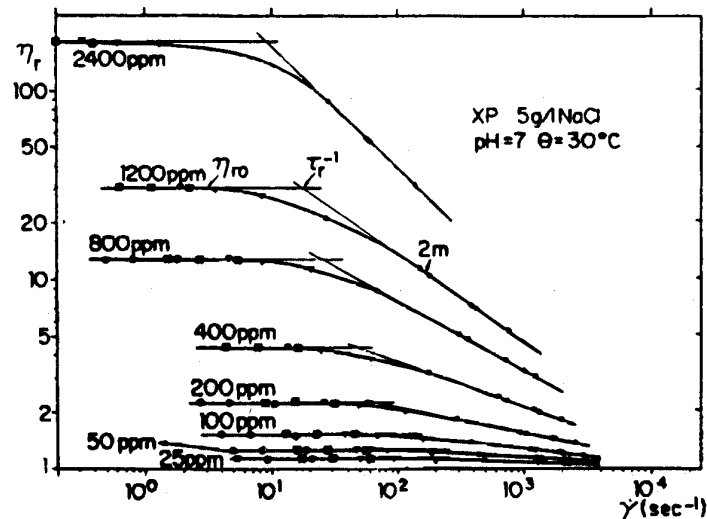


FIG. 3.6 – *Comportement rhéologique de solutions de Xanthane (Chauveteau et Zaitoun, 1981).*

De façon générale, les différents comportements rhéologiques d'une solution de polymère suivant le taux de cisaillement appliqué sont les suivants :

- $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$: le comportement rhéologique de la solution de polymère est newtonien ;
- $\dot{\gamma} \simeq \dot{\gamma}_c$: le comportement rhéologique de la solution de polymère se trouve dans une zone de transition, entre un comportement newtonien et non newtonien. Le taux de cisaillement critique $\dot{\gamma}_c$ est inversement proportionnel à la viscosité du solvant. En d'autres termes, plus le solvant est visqueux, plus le comportement non newtonien de la solution apparaît rapidement ;
- $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$: le comportement rhéologique de la solution de polymère est non newtonien (ou rhéofluidifiant, rhéoépaississant, etc.).

Outre le dernier cas, il existe deux autres types de comportement rhéologique possible :

- les fluides à seuil : le matériau ne s'écoule qu'au delà d'une certaine contrainte critique ;
- les fluides rhéoépaississants : à l'inverse d'un comportement rhéofluidifiant, le fluide devient plus visqueux lorsque le cisaillement augmente.

La viscosité d'une solution rhéofluidifiante de polymère peut être caractérisée par deux constantes m et n :

$$\mu_r = m\dot{\gamma}^n \quad (3.10)$$

où μ_r est la viscosité relative, rapport entre la viscosité dynamique du polymère et celle du solvant.

3.5.2 Rhéologie des solutions de polymère en milieu poreux

Du fait de la complexité d'un milieu poreux (connectivité des pores, tailles, etc.) le comportement rhéologique des solutions de polymère s'écoulant en milieu poreux peut être très différent des écoulements se produisant dans des géométries modèles. Lors d'écoulements en milieu poreux, la taille des macromolécules n'est plus négligeable devant la taille des pores, il faut s'attendre à des effets de gêne stérique très prononcés. Ces derniers peuvent modifier sensiblement le comportement rhéologique d'une solution de polymère (Chauveteau, 1991).

A partir du modèle de Darcy 1D, il est possible de déterminer la viscosité apparente μ_{app} d'une solution de polymère s'écoulant dans un milieu poreux. Si L et S sont respectivement la longueur et la section du milieu poreux, la viscosité apparente de la solution de polymère peut s'écrire sous la forme :

$$\mu_{app} = \frac{kS}{Q} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.11)$$

où Q est le débit volume, k la perméabilité, et ΔP la perte de charge.

La viscosité apparente μ_{app} d'une solution de polymère en milieu poreux peut être très différente de la viscosité μ d'une solution identique mesurée à l'aide d'un viscosimètre traditionnel pour la même valeur de taux de cisaillement.

3.5.3 Effet de la géométrie du milieu poreux

Afin d'établir des corrélations pratiques entre les différentes propriétés, le milieu poreux est assimilé à un faisceau de n tubes capillaires de même rayon, R_P . Dans ces conditions, la loi de Poiseuille permet d'écrire :

$$Q = \frac{n\pi R_P^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.12)$$

L'égalité des sections d'écoulement du fluide impose que :

$$S\phi = n\pi R_p^2 \quad (3.13)$$

A partir de l'expression de Darcy Incompressible (2.17) et des équations (3.12) et (3.13), il est possible de montrer que la porosité ϕ , la perméabilité k et le rayon moyen de pore R_p sont liés par la relation :

$$R_p = \sqrt{\frac{8k}{\phi}} \quad (3.14)$$

Dans le cas où la taille des pores est grande devant celle des macromolécules, il est possible de déterminer le taux de cisaillement auquel est soumise une solution de polymère s'écoulant dans un faisceau de tubes capillaires par l'équation suivante :

$$\dot{\gamma} = 4v\sqrt{\frac{\phi}{8k}} \quad (3.15)$$

où $v = Q/S$ est la vitesse d'écoulement de la solution, ϕ la porosité, k la perméabilité.

Dans le cas général d'un milieu poreux, les expressions (3.14) et (3.15) sont corrigées à l'aide d'un facteur tenant compte de la tortuosité du milieu :

$$R_p = \alpha_s \sqrt{\frac{8k}{\phi}} \quad (3.16)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4v}{\alpha_s} \sqrt{\frac{\phi}{8k}} \quad (3.17)$$

où α_s est un coefficient correctif de géométrie déterminé en identifiant le taux de cisaillement critique $\dot{\gamma}_c$ des mesures de viscosimètre avec celui des mesures en milieu poreux.

De la même manière que lors d'un écoulement hors milieu poreux, différents comportements rhéologiques peuvent être mis en évidence :

- $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$: le comportement rhéologique de la solution de polymère est newtonien ;
- $\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c$: le comportement rhéologique de la solution de polymère est rhéofluidifiant, la valeur du taux de cisaillement critique est du même ordre de grandeur que celle obtenue lors d'un écoulement hors milieu poreux.

L'expression du débit volume peut alors être déduite de la manière suivante :

$$Q = \frac{\dot{\gamma}S(R_p - \varepsilon_h)}{4\alpha_G} \quad (3.18)$$

où α_G est un coefficient de correction géométrique et ε_h l'épaisseur de la couche de polymère adsorbé.

Le débit d'injection des solutions de polymère est calculé à l'aide des équations (3.17) et (3.18). Le polymère est injecté en régime newtonien afin d'en optimiser l'adsorption. Les coefficients de correction α_s et α_G sont tirés de la littérature. Par exemple pour un milieu poreux non consolidé constitué de SiC $30 \mu m$, leurs valeurs sont : $\alpha_s = 1,15$ et $\alpha_G = 2,5$. Pour une solution de polyacrylamide de concentration 1000 ppm le débit maximum d'injection ne devra pas excéder $10 \text{ cm}^3 \cdot h^{-1}$, pour rester dans la zone d'écoulement newtonien, afin que les chaînes de polymère ne subissent pas de déformation.

3.5.4 Effet de paroi sur la viscosité apparente d'une solution de polymère

La différence entre la viscosité μ (écoulement hors milieu poreux) et la viscosité apparente μ_{app} (écoulement en milieu poreux) est souvent attribuée à des phénomènes d'interactions entre la paroi des pores et la solution de polymère en écoulement. Deux cas peuvent alors se présenter :

- **interaction répulsive** : μ_{app} est inférieure à μ et diminue avec le diamètre de pore. La probabilité est faible pour que le centre de masse de la macromolécule se trouve à une distance de la paroi inférieure au rayon de giration R_G . Par conséquent, la concentration de la solution de polymère à la paroi des pores est plus faible qu'au centre de l'écoulement. Ce type de phénomène est appelé couche de déplétion ;
- **interaction attractive** : μ_{app} peut être inférieure ou bien supérieure à μ . La concentration de polymère à la paroi a un effet plus ou moins prononcé sur le comportement rhéologique de la solution de polymère. Cet effet dépend de l'énergie d'adsorption des macromolécules à la paroi, qui elle-même dépend des affinités relatives entre polymère, solvant et paroi.

3.6 Stabilité des polymères

La dégradation de chaînes de polymère peut être due soit à une oxydation thermique ou d'UV, soit à des attaques bactériologiques. Le taux d'oxydation d'un polymère dépend principalement de sa structure chimique et des conditions dans lesquelles il est utilisé. Pour des matières plastiques, cette dégradation a pour conséquence une décoloration de la matière, une perte de propriétés physiques (élongation, résistance à l'impact, flexibilité...).

Dans le cas de polyoléfines, des antioxydants sont ajoutés pour éviter ou interrompre ces processus d'oxydation, lesquels peuvent avoir lieu durant toutes les étapes de la vie du polymère : polymérisation, stockage, mise en forme et usage final.

La figure (3.7) résume les différentes étapes de la dégradation d'une solution de polymère soumise à un apport d'énergie thermique et UV. C'est pour éviter ces types de dégradation que les solutions de polymère injectées dans les milieux poreux en laboratoire sont conservées au froid et à l'abri de la lumière. De plus, un bactéricide est ajouté à la solution pour protéger les macromolécules des bactéries qui pourraient pénétrer la solution.

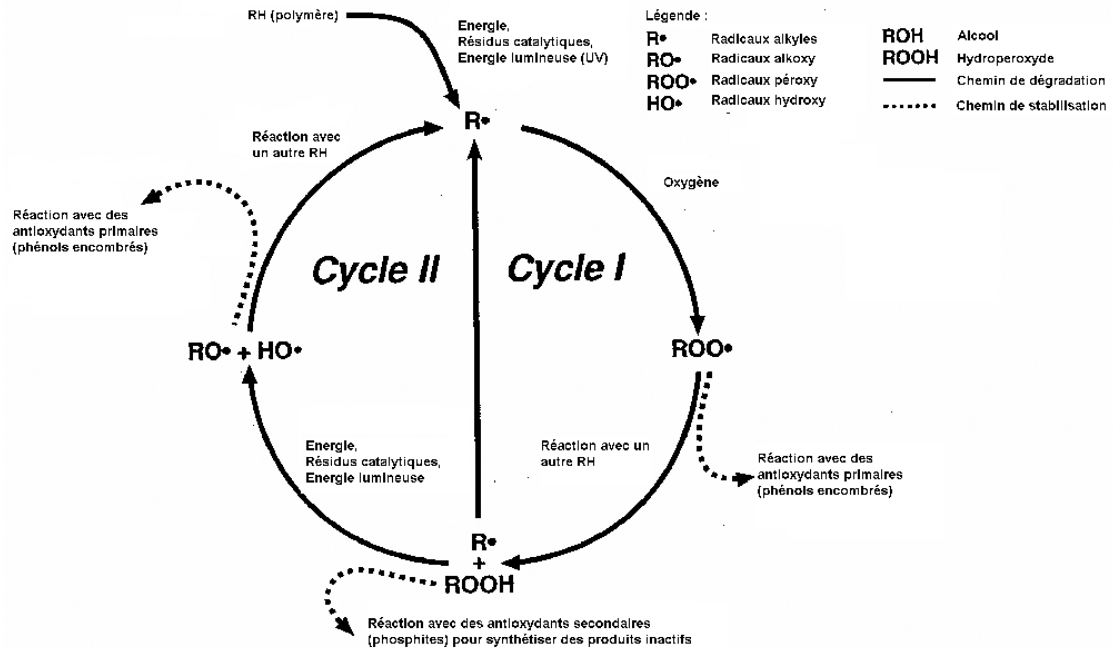


FIG. 3.7 – Cycles de stabilisation de polymère.

3.7 Mécanismes de rétention et d'adsorption des polymères en milieu poreux

L'origine du phénomène d'adsorption réside dans les interactions entre les macromolécules et la surface porale, lequel a pour principales conséquences :

- baisse transitoire de la concentration de la solution de polymère en sortie ;
- délai de percée plus important du front de polymère à travers le milieu saturé en eau ;
- réduction de perméabilité en présence de polymère adsorbé.

Trois principaux mécanismes de rétention peuvent se produire (FIG. (3.8)) :

- **l'adsorption** : rétention irréversible de polymère en milieu poreux. Elle est caractérisée par l'apparition de liaisons (Van der Waals, hydrogènes, ioniques, etc.) entre les chaînes polymériques et la paroi du milieu poreux, lesquelles entraînent une fixation des macromolécules à la surface porale ;

- le **piégeage mécanique** : piégeage des macromolécules dans les pores de très petites tailles ;
- la **rétenion hydrodynamique** : accumulation de macromolécules au niveau des points stagnants du réseau poral. C'est un piégeage réversible qui dépend du débit d'injection de polymère.

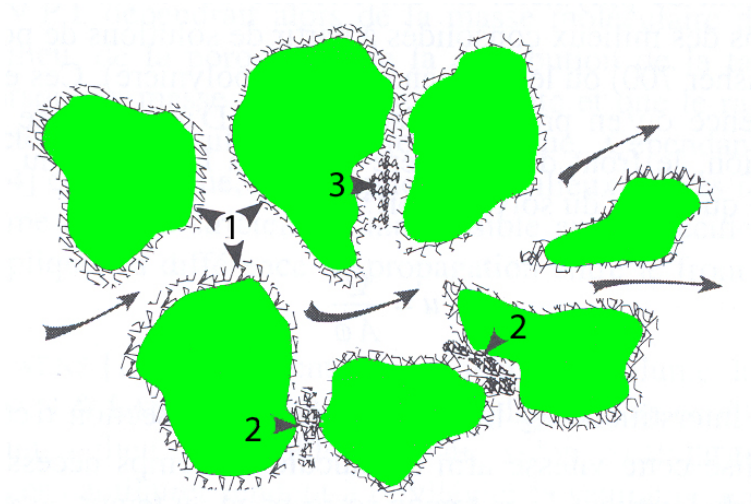


FIG. 3.8 – Mécanismes de rétention de polymère en milieu poreux : (1) adsorption, (2) piégeage mécanique, (3) piégeage hydrodynamique.

3.7.1 Effet du volume de pores inaccessibles

On considère un milieu poreux homogène saturé par un fluide 1 dans lequel est injecté un traceur. Le modèle de diffusion/dispersion en milieu poreux, que nous ne développerons pas ici, permet d'évaluer le temps de sortie du traceur injecté ($x = 1VP$ pour $C/C_o = 1/2$). Si une solution de polymère non adsorbant est injectée dans un milieu poreux, la percée de cette solution est observée plus tôt que celle du solvant (FIG. 3.9).

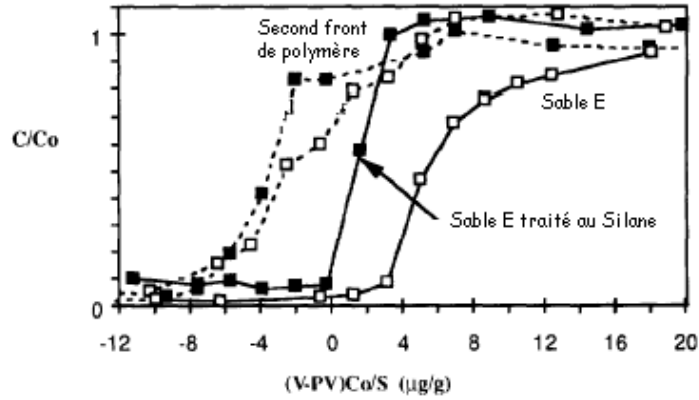


FIG. 3.9 – Illustration du phénomène de volume exclu à une solution de polymère dans un milieu non adsorbant (Broseta et al., 1995).

Cette différence de temps de sortie entre le traceur et la solution de polymère a été expliquée par l'existence d'un volume de pores inaccessibles (Dawson et Lantz, 1972). En effet, les pores de plus petite taille que le rayon de giration des macromolécules sont hors d'atteinte. Par conséquent, le volume de pores que doit traverser la solution de polymère est plus petit que celui du traceur, cela se traduit donc par un temps de sortie plus court. Dans ces conditions, la vitesse interstitielle de propagation de la solution de polymère s'exprime par :

$$v_{poly} = \frac{Q_{poly}}{S\phi_{poly}} \quad (3.19)$$

où Q_{poly} est le débit volume de la solution de polymère, S la section d'écoulement du milieu poreux et ϕ_{poly} la porosité effective du milieu accessible au polymère.

Le volume de pores inaccessibles représente la fraction de l'espace poral non accessible aux macromolécules pour des raisons d'encombrement stérique. Il peut être calculé par l'équation suivante :

$$V_{pi} = V_p(\phi - \phi_{poly}) \quad (3.20)$$

où V_{pi} , V_p , ϕ et ϕ_{poly} sont respectivement le volume de pores inaccessibles, le volume de pores, la porosité du milieu poreux et la porosité accessible au polymère.

Cet effet s'oppose à l'effet de rétention qui induit un retard de sortie de la solution de polymère.

3.7.2 Couche de déplétion

En l'absence de phénomène de rétention des macromolécules il a été observé, en régime newtonien, une viscosité apparente en milieu poreux plus faible que celle déterminée à l'aide d'un viscosimètre. Cette différence est d'autant plus grande que la taille des pores est petite (Chauveteau et Zaitoun, 1981). Cette diminution de la viscosité apparente lors d'une diminution du diamètre de pore a été expliquée par l'existence d'une **couche de déplétion** proche de la paroi.

Cohen et Metzner (1982) ont observé que lors d'écoulement dans des tubes ou autres canaux, le polymère dissous a tendance à se répartir en s'éloignant de la paroi du conduit. Ceci génère une région de faible viscosité au niveau de la paroi, si bien que la majeure partie de la solution semble "glisser" plus facilement à travers le conduit que si la concentration était uniforme.

Cette couche de déplétion est due à une gêne stérique qui réduit la probabilité du centre de masse de la macromolécule de se trouver à une distance de la paroi inférieure au rayon de giration de la molécule. La concentration en polymère augmente donc à partir d'une valeur nulle à la paroi jusqu'à une valeur égale à la concentration de la solution. Cette zone de déplétion est davantage accentuée dans le cas de polymères flexibles (Chauveteau, 1991).

Comme pour l'existence d'un volume de pores inaccessible décrit précédemment, ce phénomène contribue également à la sortie précoce du polymère.

3.7.3 Phénomène d'adsorption de polymère en milieu poreux

L'adsorption d'un polymère sur les parois d'un milieu poreux présente les caractéristiques suivantes :

- elle est quasiment irréversible, due aux multiples points d'ancrage. Les macromolécules de forte masse moléculaire qui ont été adsorbées à la surface porale, restent fixées au milieu poreux ;
- Pour un polyacrylamide neutre, son rayon de giration est de l'ordre de $0,16 \mu m$, soit une épaisseur de couche de polymère adsorbé de $0,32 \mu m$. Cela a pour conséquence de modifier notablement les écoulements des fluides à travers le milieu poreux.

Le taux d'adsorption est défini par :

$$\Gamma = \frac{m_{poly}}{m_{total}} \quad (3.21)$$

où m_{poly} et m_{total} sont respectivement les masses de polymère adsorbé et du milieu poreux. Γ est couramment exprimé en $\mu g \cdot g^{-1}$.

Dans le cas du polyacrylamide neutre, les macromolécules ne subissent pas de répulsion de charges avec la surface porale. Il est alors observé un taux d'adsorption élevé, de l'ordre de $100 \mu\text{g.g}^{-1}$ pour des grès argileux naturels (Zaitoun et Kohler, 1988; Elmkies, 2001).

Des observations ont également permis de constater que plus la surface spécifique d'un milieu poreux est importante plus il y aura de surface disponible pour que le polymère s'adsorbe, donc le taux d'adsorption augmente (Broseta *et al.*, 1995).

De surcroît, le taux d'adsorption est d'autant plus élevé que la solution de polymère est concentrée (pour un même temps d'injection).

3.8 Conclusions

Un polymère est une macromolécule composée d'une succession de monomères. Différents types de polymère peuvent être rencontrés tels que les homopolymères, les copolymères, les terpolymères, les polymères branchés, etc. Le type de polymère dépend principalement des conditions de polymérisation. Il existe évidemment des polymères naturels très complexes et pour lesquels aucune méthode de polymérisation n'est encore connue à ce jour.

Les grandeurs physiques caractérisant un polymère sont principalement : la masse moléculaire, la polydispersité, le rayon de giration et la réactivité des fonctions chimiques le composant.

Hors milieu poreux, le comportement rhéologique d'une solution de polymère peut comprendre trois zones : newtonienne, transitoire et non newtonienne (rhéofluidifiante ou rhéoépaississante). En milieu poreux, ce comportement peut être très différent du fait de la complexité de l'environnement dans lequel la solution évolue. Différents effets influent sur cet écoulement : la géométrie du milieu (volume de pores inaccessibles) et les effets de paroi (adsorption, réactions chimiques,...).

Les chaînes polymériques sont très rarement stables par rapport à leur environnement. En effet, la lumière, la chaleur, les bactéries peuvent venir initier des réactions de dégradation des macromolécules. Cette dégradation sera d'autant plus importante et rapide que le taux d'insaturation du polymère sera élevé.

Chapitre 4

Écoulements en milieu poreux en présence de polymère adsorbé

De nombreuses études ont été réalisées pour examiner l'influence d'une couche de polymère sur des écoulements diphasiques huile/eau ou gaz/eau. Dans l'ensemble des cas, la réduction de perméabilité à l'eau était toujours la plus importante. Ce phénomène de **réduction sélective de perméabilité** est à la base de l'utilisation des polymères dans la prévention des venues d'eau. Par conséquent, l'étude de ces mécanismes physiques est un enjeu majeur pour le développement de cette technique.

4.1 Réduction sélective de perméabilité - Réduction de mobilité

La réduction de perméabilité pour un fluide β circulant à la même vitesse dans un milieu poreux de perméabilité k_β est définie par la relation :

$$R_{k\beta} = \frac{\Delta P_\beta^{(2)}}{\Delta P_\beta^{(1)}} > 1 \quad (4.1)$$

où les indices (1) et (2) indiquent respectivement l'absence et la présence d'une couche de polymère adsorbé.

R_k est d'autant plus grand que la réduction de perméabilité est forte.

L'expression **réduction sélective de perméabilité** est employée lorsque la présence de polymère adsorbé réduit la perméabilité à l'eau k_w de manière plus importante qu'elle ne réduit la perméabilité au gaz $k_g(P_2)$ ou à l'huile k_o .

La **réduction de mobilité**, R_M , ou facteur de résistance est défini par le rapport de la perte de charge qui s'établit lors de l'écoulement de la solution de polymère

à travers le milieu poreux sur celle lors de l'écoulement de saumure en absence de polymère. A partir de la relation de Darcy Incompressible, il est possible d'écrire la relation reliant les différences de pression aux perméabilités, R_M ayant alors pour expression :

$$R_M = \frac{\Delta P_{poly}}{\Delta P_{\beta}^{(1)}} \quad (4.2)$$

où ΔP_{poly} est la perte de charge induite par l'écoulement de la solution de polymère.

4.2 Mécanismes à l'origine de la réduction sélective de perméabilité

4.2.1 Effet de gonflement / contraction de la couche de polymère adsorbé

Mennella *et al.* (1998), ont tenté d'expliquer le phénomène de réduction sélective de perméabilité pour des écoulements huile/eau en présence d'une couche de polymère adsorbé à partir d'un milieu poreux modèle constitué d'un empilement aléatoire de sphères identiques de rayon r_o . Le modèle des sphères empilées leur a permis de montrer que la perméabilité était proportionnelle au carré du rayon des sphères. En supposant que la couche de polymère est uniforme et d'épaisseur ε_h , les auteurs ont modélisé l'adsorption du polymère en augmentant le rayon des sphères d'une épaisseur équivalente.

En comparant les résultats expérimentaux observés dans le cas d'un polymère cationique adsorbé sur du quartz non-consolidé pour des écoulements eau/huile et les résultats prédits par le modèle des sphères dures (MSD), les auteurs ont trouvé :

- un bon accord pour la perméabilité à l'eau avec une épaisseur de couche de $0,9 \mu m$;
- un accord de même nature pour la perméabilité à l'huile pour une épaisseur de $0,05 \mu m$.

De ces observations, les auteurs ont conclu que la réduction sélective de perméabilité était due à un phénomène de gonflement/contraction selon la nature du fluide s'écoulant (gonflement pour de l'eau dû à l'hydratation du polymère (FIG. 4.1) et contraction pour l'huile due à un écrasement du polymère par capillarité (FIG. 4.2)).

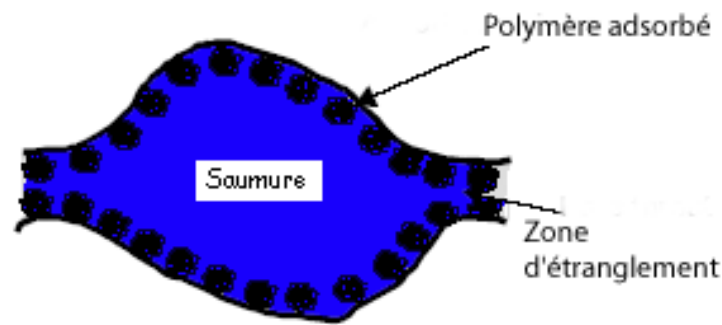


FIG. 4.1 – Représentation schématique de l'effet d'une couche de polymère adsorbé en écoulement monophasique. La couche réduit la zone d'étranglement causant une réduction de perméabilité.

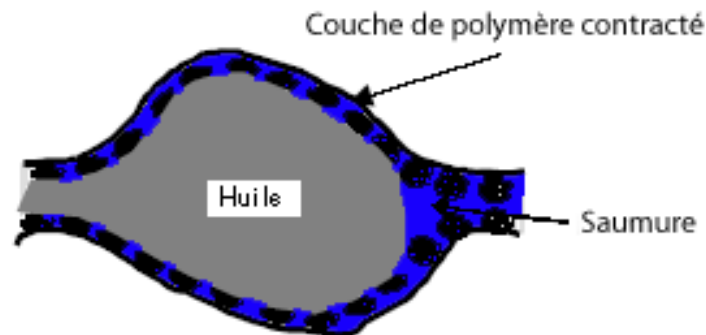


FIG. 4.2 – Mécanisme expliquant la réduction sélective de perméabilité. Lorsque la phase huile s'écoule, la pression capillaire entraîne une contraction de la couche de polymère.

Par ailleurs, les auteurs expliquent la réduction de perméabilité par un effet d'altération de la géométrie du milieu poreux (réduction de la taille des pores).

Des résultats similaires ont été observés (Dawe et Zhang, 1994) avec un micro-modèle bidimensionnel et un gel. Ces observations corroborent également d'autres résultats de la littérature (Sparlin et Hagen, 1984).

Pour des écoulements gaz/eau, un raisonnement similaire permet d'expliquer la réduction sélective de perméabilité. En effet, si l'écoulement d'eau se trouve gêné par la présence de la couche de polymère, cette dernière s'écrase à la paroi lors du passage du gaz.

4.2.2 Écoulements partitionnés des fluides

Un grand nombre d'auteurs (White *et al.*, 1973; Schneider et Owens, 1982; Liang *et al.*, 1994; Nilsson *et al.*, 1998) a interprété l'influence du polymère par l'hypothèse suivante : un milieu poreux est constitué de deux réseaux distincts de pores, l'un dans lequel s'écoule l'eau et l'autre dans lequel s'écoule l'huile. Ils en ont conclu que le polymère (solution hydrosoluble) allait principalement obstruer les pores mouillables à l'eau. C'est pour cette raison, d'après eux, qu'une réduction sélective de perméabilité est observée après injection d'une solution hydrosoluble de polymère dans un milieu poreux.

Une étude sur l'effet de l'adsorption d'un polymère hydrolysé et d'un biopolymère sur trois milieux poreux modèles de mouillabilités différentes a été effectuée par Nilsson *et al.* (1998). Les trois milieux poreux considérés étaient :

- un milieu non consolidé à base de quartz, mouillable à l'eau ;
- un milieu à base de Téflon, mouillable à l'huile ;
- un milieu à base de quartz et de Téflon, de mouillabilité fractionnaire.

Les expériences ont montré que l'effet sélectif de réduction des perméabilités relatives était faible sur des milieux mouillables à l'eau. Par contre pour des milieux mouillables à l'huile et à mouillabilité fractionnaire, cet effet augmentait fortement et de façon plus importante pour le dernier cas. Ce résultat est expliqué en mettant en avant la différence entre les canaux d'écoulement de l'eau et de l'huile. Comme cette disparité est plus prononcée sur le milieu de mouillabilité fractionnaire, les auteurs en concluent que la réduction sélective de perméabilité peut être comprise en terme de cheminements préférentiels, lesquels sont gouvernés par la mouillabilité et la taille des pores.

4.2.3 Modification de mouillabilité

Afin de comprendre comment une couche de polymère adsorbé peut réduire sélectivement la perméabilité à l'eau par rapport à celle à l'huile, certains auteurs (Zaitoun et Kohler, 1988) ont avancé l'hypothèse selon laquelle l'adsorption de polymère en milieu poreux conduit à une **modification de la mouillabilité** du milieu. En effet, la solution de polymère étant hydrophile, son adsorption a pour conséquence de rendre mouillable à l'eau les réseaux de pores mouillables initialement à l'huile. Ce changement de mouillabilité a pour conséquence de réduire la vitesse de propagation de l'eau et d'augmenter l'effet de lubrification sur l'écoulement de l'huile. Ceci s'accompagne alors d'une réduction sélective de perméabilité.

Broseta *et al.* (1995) ont également étudié l'effet de mouillabilité sur les phénomènes d'adsorption/rétention de polymère en milieu poreux. Dans des massifs entièrement saturés en eau, ils ont montré que le taux d'adsorption de polymère, Γ , était plus élevé pour des surfaces hydrophobes que pour des surfaces hydrophiles. Cet effet

s'est révélé plus prononcé pour des polymères anioniques et des solvants à salinité élevée. En présence d'huile résiduelle, une différence de comportement selon l'état de la mouillabilité a été mis en évidence. En effet, si le milieu est mouillable à l'eau, Γ augmente faiblement, alors que si il est mouillable à l'huile, Γ est fortement diminué. Les auteurs ont attribué ce phénomène à la compétition entre deux effets opposés :

- en présence d'huile résiduelle, l'adsorption augmente en raison d'une surface adsorbante d'huile supplémentaire pouvant s'offrir au polymère (cas d'un milieu mouillable à l'eau dans lequel l'huile est piégée sous forme de gouttelettes au centre des pores);
- l'huile résiduelle peut limiter l'accès du polymère à la surface porale, d'où une diminution du taux d'adsorption (cas d'un milieu mouillable à l'huile dans lequel l'huile résiduelle se trouve sous forme de films recouvrant la roche).

4.2.4 Effet de paroi

Le phénomène d'adsorption de polymère en milieu poreux se traduit par la formation d'une couche de polymère recouvrant les surfaces porales, laquelle implique une réduction de la section des pores. De nombreux auteurs (Zaitoun et Kohler, 1988; Barreau, 1996; Zaitoun *et al.*, 1998; Zaitoun et Kohler, 2000) attribuent la réduction sélective de perméabilité à un effet de paroi résultant de la présence de cette couche de polymère.

Dans le cas d'une roche fortement mouillable à l'eau, la figure (4.3) montre que la présence de gouttelettes d'huile réduit significativement la section accessible au passage de l'eau durant son écoulement (cette restriction n'existant pas durant l'injection d'huile). En conséquence, pour une épaisseur de polymère donnée, la réduction de perméabilité à l'eau sera plus grande que celle concernant l'huile.

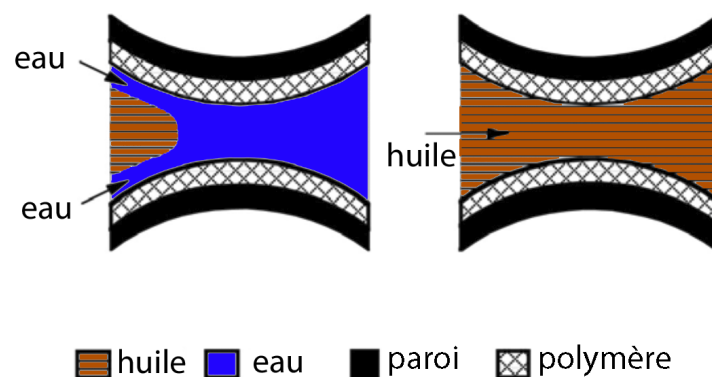


FIG. 4.3 – Représentation schématique de l'effet de paroi.

L'**effet de paroi** est donc principalement un effet de **réduction de la section de pore** à travers laquelle s'effectue l'écoulement d'eau. Les expériences d'adsorption

de polyacrylamide sur des grès naturels, réalisées par différents auteurs (Barreau, 1996; Zaitoun *et al.*, 1998) ont pu être interprétées de cette manière, du fait de la présence d'une couche de polymère adsorbé à la paroi.

4.2.5 Effet de la présence d'une gouttelette de gel ("gel-droplet model")

Pour des milieux poreux mouillables à l'huile et en présence d'un gel hydrophile (non mouillant), Liang et Seright (2000) se sont inspirés des travaux de Nilsson *et al.* (1998) pour expliquer le phénomène de réduction sélective de perméabilité par la présence d'une gouttelette de gel au centre des pores. En effet, pour un milieu poreux mouillable à l'huile, les auteurs expliquent qu'avant traitement par un gel, des gouttelettes d'eau se forment au centre des pores durant l'écoulement d'huile, et par conséquent, réduisent la section efficace qui lui est accessible. Au contraire, lors de l'écoulement d'eau ces gouttelettes sont inexistantes.

Après traitement à l'aide d'un gel hydrophile, les auteurs supposent que des gouttelettes de gel se forment au centre des pores lors de la gélification, la paroi du milieu poreux étant fortement mouillable à l'huile. Si ces gouttelettes n'ont que très peu d'influence sur les conditions d'écoulement de l'huile, elles vont cependant réduire fortement la perméabilité effective à l'eau comme l'illustre la figure (4.4) ci-dessous.

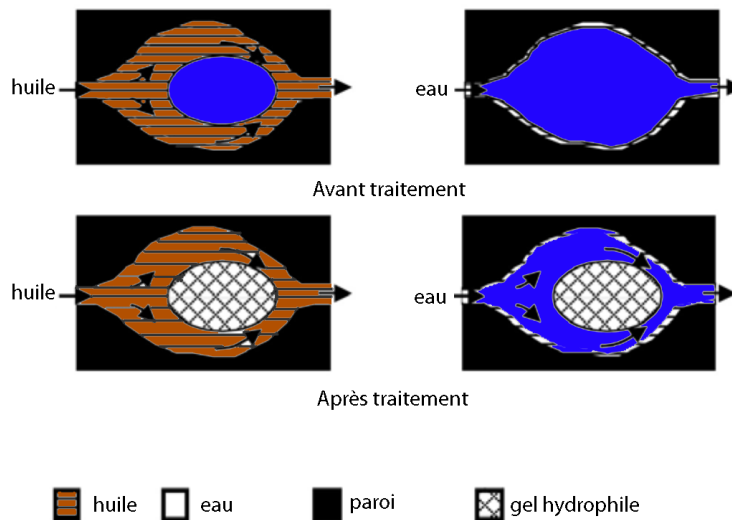


FIG. 4.4 – *Modèle de la gouttelette : roche fortement mouillable à l'huile.*

Pour les auteurs, l'effet de paroi et le modèle de la gouttelette de gel sont complémentaires. En effet, la réduction sélective de perméabilité est bien expliquée par l'effet de paroi lorsque la solution de polymère ou le gel sont des phases mouillantes du milieu poreux. Cependant, dans le cas contraire, le modèle de la gouttelette de gel permet d'expliquer les résultats expérimentaux.

4.2.6 Effet du polymère sur la pression capillaire

Les études sur des écoulements eau/huile menées par différents auteurs (Zaitoun et Kohler, 1988; Barreau, 1996; Zaitoun et Kohler, 2000) ont permis de mettre en évidence une augmentation de la pression capillaire, après adsorption de polymère sur des grès naturels. Cette augmentation est liée à une réduction de la taille des pores, dans la mesure où, d'une part la pression capillaire est proportionnelle au rapport de la tension interfaciale au rayon de pore et, d'autre part, la tension interfaciale polymère/huile est légèrement inférieure à celle eau/huile.

En effet, la pression capillaire dans un tube capillaire de section droite, circulaire, peut s'exprimer par la relation :

$$P_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (4.3)$$

où r est le rayon du capillaire, γ la tension interfaciale et θ l'angle de mouillage.

En présence d'une couche de polymère adsorbé d'épaisseur ε_h , l'expression 4.3 devient :

$$P_c = \frac{2\gamma \cos\theta}{r - \varepsilon_h} \quad (4.4)$$

Cette observation expérimentale reste cohérente avec l'hypothèse de l'effet de paroi. Des simulations numériques sont venues confirmer ces résultats expérimentaux (Barreau *et al.*, 1995).

4.3 Conclusions

La présence d'une couche de polymère adsorbé à la paroi des pores a pour conséquence de modifier fortement les écoulements. Dans la littérature, cette propriété a principalement été étudiée sur des écoulements polyphasiques eau/huile mais peu sur les écoulements gaz/eau.

L'effet le plus notable de cette couche de polymère est sa capacité à réduire sélectivement la perméabilité à l'eau par rapport à la perméabilité relative à l'huile ou au gaz.

Plusieurs hypothèses, ont été proposées pour expliquer ce phénomène :

- effet de gonflement/contraction de la couche de polymère ;
- écoulements partitionnés des fluides ;
- modification de la mouillabilité ;

- effet de paroi;
- effet de la présence d'une gouttelette de gel.

En outre, en réduisant le rayon de pore, la couche de polymère peut induire une augmentation de la pression capillaire.

Chapitre 5

Étude expérimentale de l'influence d'une couche de polymère adsorbé sur l'effet Klinkenberg

A pression atmosphérique, l'observation d'une différence entre la perméabilité absolue, k , et celle au gaz, $k_g(atm)$, est connue sous le nom "d'effet Klinkenberg" dont les origines physiques ont été rappelées en section 2.3. Ce chapitre traitera de l'influence de la présence d'une couche de polymère adsorbé sur ce phénomène. Pour cette étude, il est nécessaire dans un premier temps, de déterminer les perméabilités au gaz et à la saumure ainsi que les perméabilités effectives au gaz sur un milieu en l'absence de polymère. Dans un second temps, une nouvelle détermination de ces propriétés sur le même milieu en présence d'une couche de polymère adsorbé sera effectuée. Les expériences présentées ont été réalisées sur des massifs non consolidés obtenus à partir de poudres monodisperses de carbure de silicium (SiC) de différentes granulométries. Les fluides utilisés pour les déterminations des perméabilités sont le diazote sec et la saumure.

5.1 Description du projet expérimental

Le principe de l'étude est d'évaluer l'effet de la présence de polymère adsorbé sur l'effet Klinkenberg. Pour cela, il est nécessaire dans un premier temps, de bien caractériser l'effet Klinkenberg sur des massifs de différentes perméabilités débouchant sur une estimation du diamètre moyen de pore à partir de la constante, C . Cette estimation est alors comparée avec celle obtenue à partir de la perméabilité absolue, k . Ensuite, l'influence de la valeur de la saturation stationnaire en saumure, $S_w(Q_{1max})$, est étudiée en absence de polymère puis en présence de polymère.

5.1.1 Caractéristiques et préparation des fluides

- **La saumure** est obtenue par dissolution d'iodure de potassium (KI), à raison de 5 g.l^{-1} , puis dégazée sous vide, filtrée au travers d'un filtre de $0,22 \mu\text{m}$ et stockée sous atmosphère inerte (Hélium). Elle servira également à la préparation de la solution de polymère.
- **Le gaz injecté** est du diazote sec.
- **La solution de polymère** est préparée par dissolution de 1 g.l^{-1} , soit 1000 ppm, d'une poudre de polyacrylamide neutre (Floerger FA 920 SH) dans la saumure. De l'azide de sodium (NaN_3) y est ajouté comme bactéricide à raison de $0,4 \text{ g.l}^{-1}$. La dissolution complète du polymère est obtenue par agitation magnétique lente d'une durée de 24 heures. Afin de supprimer les agrégats de macromolécules, la solution est ensuite surfiltrée à 5 ml/h au travers de trois filtres **Millipores**® consécutifs, de diamètre 130 mm, présentant respectivement des tailles de pores de 8, 3 et $1,2 \mu\text{m}$ (Chauveteau et Kholer, 1984). Cette opération est destinée à prévenir le colmatage du milieu poreux par la présence d'agrégats, même en petit nombre. La solution est ensuite préservée de la lumière et conservée au réfrigérateur ($\simeq 5^\circ\text{C}$).

La courbe de viscosité de la solution de polymère (FIG. 5.1) a été obtenue grâce à un viscosimètre **Contraves LS 30**® à cylindres coaxiaux. La solution de polymère est injectée dans le milieu poreux en régime newtonien, dont la valeur plateau de la viscosité relative est de 4,6 à une température de 30°C . La concentration exacte de la solution de polymère est obtenue par mesure du taux de carbone organique (TOC) à l'aide d'un analyseur de carbone **Dohrmann DC80**®, celle-ci vaut 1140 ppm .

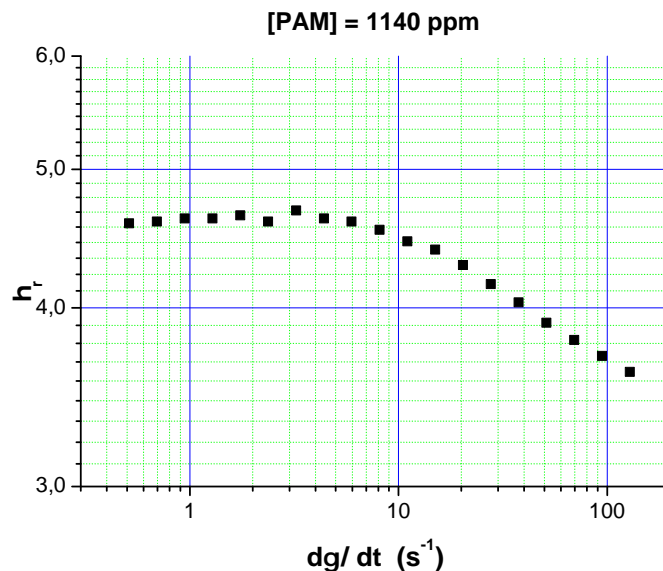


FIG. 5.1 – Comportement rhéologique de la solution de polyacrylamide de concentration 1140 ppm. Mesures réalisées à $T = 30^\circ\text{C}$.

5.1.2 Caractéristiques des milieux poreux

L'ensemble des expériences a été effectué sur des massifs non consolidés obtenus à partir de poudres monodisperses de SiC présentant des granulométries de 5, 8, 18, 30 et 50 μm dont les propriétés de structure géométrique et de surface sont fournies dans le tableau (5.3) (Chauveteau *et al.*, 1996; Médout-Madère *et al.*, 2000). Chaque échantillon a été réalisé par tassage mécanique à l'aide d'un tapis vibrant. Cette méthode permet la réalisation de milieux poreux dont les propriétés pétrophysiques (ϕ , k_w) sont très reproductibles.

Le **milieu poreux** étudié se présente sous forme cylindrique d'une longueur d'environ 10 *cm* et de diamètre 4 *cm*. Des embouts en nylon sont disposés à ses extrémités, lesquels embouts possèdent chacun deux entrées qui permettent l'injection ou la récupération des fluides d'une part, et les prises de pression d'autre part. L'étanchéité de la cellule est assurée par des joints toriques en nitrile. Une grille de nylon est placée entre le milieu poreux et les embouts afin d'empêcher le passage de grains de SiC dans les circuits de fluide du dispositif.

5.1.3 Méthodes de mesure

La mesure de **porosité** est obtenue soit par bilan de masse solide : la cellule est pesée vide puis de nouveau lorsqu'elle est remplie ; soit par bilan de masse fluide : le massif est pesé à sec et une seconde fois lorsqu'il est saturé en saumure. La différence de masse et la connaissance des masses volumiques du SiC et de la saumure (soit 3,217 et 1 $g.cm^{-3}$) permettent dans les deux cas de déterminer le volume de pores du milieu, donc la porosité (cf. Eq. (5.1)). Une mesure complémentaire de cette dernière est réalisée par atténuation γ , méthode détaillée ci-dessous.

$$\phi = 1 - \frac{m_i}{V_T \rho_i} \quad (5.1)$$

où m_i et ρ_i représentent respectivement la masse et la masse volumique du composé i (saumure ou SiC) et V_T le volume total de la cellule.

Les mesures de **perméabilité** effective au gaz pour des saturations stationnaires en saumure ont toutes été réalisées sur le même principe en présence ou en absence de polymère adsorbé. Tout d'abord, la saturation stationnaire est obtenue par déplacement de la saumure en injectant le gaz au débit le plus élevé noté Q_{1max} jusqu'à stabilisation de la perte de charge mesurée aux bornes du milieu poreux. Ensuite, les mesures de perméabilité effective au gaz pour différentes contre-pressions P_2 sont obtenues en mesurant la perte de charge aux bornes du massif pour différents débits de gaz imposés en entrée de cellule, ces débits étant toujours inférieurs à Q_{1max} . La valeur de la perméabilité effective au gaz, à la saturation stationnaire en saumure $S_w(Q_{1max})$, est déterminée à l'aide de la loi de Darcy.

Mesures de la porosité et de la saturation résiduelle par absorption γ

Cette méthode consiste à mesurer l'atténuation d'un faisceau γ traversant la cellule, laquelle est principalement due à une absorption d'énergie par le milieu et la saumure présente dans le milieu, l'atténuation dans le gaz restant négligeable. La source utilisée est de l'Amercium 241, présentant une énergie de rayonnement de 59,6 keV et une activité de 300 *mCi*.

L'atténuation du rayonnement γ est déterminée grâce à la loi de Beer-Lambert définie comme suit :

$$N = N_0 \cdot \exp\left(-\sum_i \xi_i y_i\right) \quad (5.2)$$

où N et N_0 sont les nombres de photons émergeant du milieu poreux et émis par la source dans la direction du rayon, ξ_i et y_i sont respectivement le coefficient d'absorption et l'épaisseur de la phase i traversée.

Détermination de la porosité

Afin de déterminer la porosité, deux mesures d'atténuation sont effectuées sur le milieu poreux. Une première est réalisée sur le milieu sec (N_1) et une seconde sur le milieu saturé en saumure (N_2). En notant σ et w les indices pour la phase solide et liquide, l'équation (5.2) devient pour chaque cas :

$$N_1 = N_0 \cdot \exp(-\xi_\sigma y_\sigma) \quad (5.3)$$

$$N_2 = N_0 \cdot \exp(-\xi_\sigma y_\sigma - \xi_w y_w) \quad (5.4)$$

En notant l et y_w les épaisseurs de l'échantillon et de la phase liquide traversées par le rayonnement gamma, on a :

$$y_w = l\phi \quad (5.5)$$

qui, combinée aux équations (5.3) et (5.4) conduit à l'expression de la porosité ϕ qui s'écrit :

$$\phi = \frac{1}{l\xi_w} \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (5.6)$$

Détermination de la saturation

En présence d'une saturation en saumure S_w , l'équation 5.5 s'écrit sous la forme :

$$y_w = l\phi S_w \quad (5.7)$$

Dans le même ordre d'idée, l'atténuation du rayonnement gamma (N_3) s'écrit :

$$N_3 = N_0 \cdot \exp(-\xi_\sigma y_\sigma - \xi_w y_w) \quad (5.8)$$

En combinant les équations (5.3), (5.7) et (5.8), l'expression de la saturation en saumure S_w peut alors s'écrire :

$$S_w = \frac{1}{l\xi_w\phi} \ln\left(\frac{N_1}{N_3}\right) \quad (5.9)$$

Dispositif expérimental

Le dispositif de mesure de la porosité et de la saturation par atténuation gamma est constitué d'un émetteur de rayon γ et d'un cristal scintillateur couplé à un photomultiplicateur. L'ensemble est rendu solidaire par un montage de type étrier. Le déplacement le long de la cellule est géré par un banc bidimensionnel conçu par **Micro-Contrôle** $\text{\textcircled{R}}$, lequel permet une investigation dans un plan de $1,1 \times 1,1 \text{ m}^2$ avec une précision de $10 \text{ }\mu\text{m}$. Nous avons utilisé un temps de comptage par point de 120 secondes, auquel il faut ajouter entre 1 à 2 secondes pour le déplacement et la transmission des données. Dans le cadre de la présente étude, le domaine retenu se limite à un déplacement longitudinal 1D suivant l'axe du cylindre de l'échantillon, soit environ 10 cm . Les mesures sont effectuées aux noeuds d'un maillage à une dimension en faisant l'hypothèse que la phase liquide est immobile.

5.2 Procédure expérimentale

5.2.1 Dispositif expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la figure (5.2). Au centre de ce dispositif, une cellule en pyrex résistant à une pression maximale de 13 *bar* est installée verticalement. Deux thermocouples de type T et un capteur de pression différentielle **Rosemount 3051** [®] (possédant une gamme de mesure de pression de 0 à 620 *mbar*) sont disposés à ses bornes et sont destinés à mesurer les températures d'entrée et de sortie du gaz d'une part, ainsi que la perte de charge dans le milieu, d'autre part. *Il est à noter qu'aucune différence de température significative n'a été observée au cours des expériences présentées dans ce chapitre.* L'injection de la saumure ou de la solution de polymère s'effectue en amont à l'aide d'une pompe **Pharmacia P500** [®] permettant une gamme de débit de 1 à 499 $cm^3.h^{-1}$. Le diazote est introduit en amont à l'aide de deux régulateurs de débit **Brooks Instrument** [®] l'un dans la gamme 0-3 $l_n.min^{-1}$, l'autre dans la gamme 0-100 $l_n.min^{-1}$. Lors de l'injection de gaz, la pression de confinement est réglée en aval à l'aide d'une vanne de contre-pression **Tescom 44-4700** [®] et mesurée à l'aide d'un capteur de pression absolue **Keller 21 SC** [®] offrant respectivement une gamme de pression de 0 à 13 *bar* et de 0 à 10 *bar*.

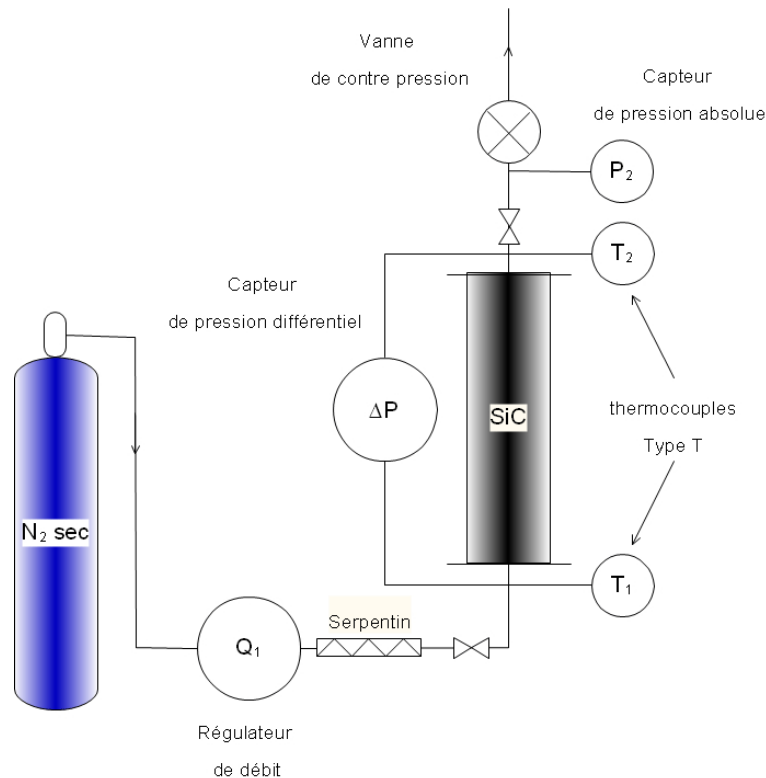


FIG. 5.2 – Dispositif expérimental pour l'étude de l'effet Klinkenberg.

Les précisions des appareils de mesure sont fournies dans le tableau (5.1).

Type d'appareil	Précision sur la mesure
Régulateur de débit	$0,7\% * Q_{N_2} + 0,2\% * PE$
Capteur de pression différentielle	$0,04\% * \Delta P$
Capteur de pression absolue	$0,05\% * P_2$
Pompe Pharmacia	$1,5\% * Q_w$

TAB. 5.1 – Précisions des appareils de mesure. PE : Pleine Échelle.

5.2.2 Protocole expérimental

1. **Injection de diazote**, à différentes valeurs de pression moyenne P_m .

Mesure de :

- la perméabilité au gaz pour chaque valeur de P_m $k_g(P_m)$

2. **Injection de dioxyde de carbone.**

3. **Saturation en saumure** du milieu.

Mesure de :

- la perméabilité absolue à l'eau k_w
- la porosité ϕ

4. **Drainage au diazote sec** - celui-ci est effectué à un débit noté Q_{1max} jusqu'à ce que la saturation en saumure devienne stationnaire (ou irréductible pour cette valeur de débit) que l'on note alors $S_w(Q_{1max})$.

Mesure de :

- la saturation stationnaire en eau $S_w(Q_{1max})$
- la perméabilité effective au gaz $k_g(S_w, P_m)$
(pour différentes valeurs de P_m)

5. **Répétition de l'étape 4 pour un nouveau débit** $Q'_{1max} > Q_{1max}$.

6. **Injection de dioxyde de carbone**, déplacement du diazote.

7. **Saturation en saumure** du milieu.

Nouvelles mesures de :

- la perméabilité absolue à l'eau k'_w
- la porosité ϕ'

8. **Injection de polymère** - Le coefficient de réduction de mobilité est déterminé pour deux séries de débits d'injection du polymère, l'une à débits croissants et l'autre à débits décroissants.

Détermination du :

- coefficient de réduction de mobilité R_M

9. **“Nettoyage” à la saumure** - Cette étape consiste à évacuer le polymère non adsorbé. Elle s'effectue à un débit équivalent à celui de l'injection de polymère. La **réduction de perméabilité** est déterminée pour deux séries d'injection de saumure, de même type que celles réalisées pour la réduction de mobilité. La valeur maximale du débit n'excède jamais $32 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Mesure de :

- la perméabilité absolue à l'eau
(après adsorption du polymère) $k_w^{(p)}$

Détermination du :

- coefficient de réduction de perméabilité à l'eau R_{kw}

10. **Drainage au diazote sec** - celui-ci est effectué à un débit noté $Q_{1max}^{(p)}$ jusqu'à ce que la saturation en saumure devienne stationnaire (ou irréductible pour cette valeur de débit) que l'on note alors $S_w^{(p)}(Q_{1max})$.

Mesure de :

- la saturation stationnaire en eau $S_w^{(p)}(Q_{1max})$
- la perméabilité effective au gaz en présence de polymère
(pour différentes valeurs de P_m) $k_g^{(p)}(S_w, P_m)$

11. **Répétition de l'étape 10 pour un nouveau débit $Q_{1max}^{(p)'} > Q_{1max}^{(p)}$.**

Les **drainages** ont lieu à des débits ne dépassant pas $3 \text{ l}_n \cdot \text{min}^{-1}$, valeur pour laquelle le nombre de Reynolds est assez faible pour que les effets inertiels ne perturbent pas les mesures de l'effet Klinkenberg.

Comme indiqué au chapitre 3, le taux de cisaillement à la paroi, lors d'un écoulement capillaire, peut être évalué grâce à l'équation 3.15 rappelée ci-dessous :

$$\dot{\gamma} = \frac{4v}{\alpha_s} \sqrt{\frac{\phi}{8k}}$$

où v est la vitesse moyenne d'écoulement, ϕ la porosité, k la perméabilité absolue du milieu poreux et α_s un coefficient correctif de géométrie du milieu poreux.

Pour un massif constitué d'un ensemble de capillaires de même diamètre, $1/\alpha_s$ vaut 1. Cette valeur est évaluée expérimentalement pour un milieu poreux et décroît avec la perméabilité, dans le cas de massif constitué de SiC, $1/\alpha_s$ est proche de 1,15 (Chauveteau *et al.*, 2002). Le polymère est toujours injecté à un taux de cisaillement suffisamment faible pour que les mesures s'effectuent en régime newtonien.

5.3 Résultats

5.3.1 Massifs secs

Dans un premier temps, l'étude a porté sur des échantillons secs pour lesquels des mesures de perméabilité au gaz ont été réalisées à différentes valeurs de pression moyenne, P_m (étape 1 du protocole expérimental). Pour éviter la présence d'effets inertiels, les expériences ont été réalisées à faibles nombres de Reynolds (cf. tab. 5.2).

Différentes granulométries de SiC ont été sélectionnées dans le but d'examiner l'influence de la perméabilité absolue sur l'effet Klinkenberg. Les valeurs maximales des nombres de Reynolds sont toujours très faibles afin de s'assurer que les effets inertiels ne viennent pas perturber les mesures (cf. tab. 5.2).

Granulométrie (μm)	Re maximum
5	$9,1 \cdot 10^{-4}$
8	$1,7 \cdot 10^{-3}$
18	$1,2 \cdot 10^{-2}$
30	$4,0 \cdot 10^{-2}$
50	$2,7 \cdot 10^{-2}$
30 ^(*)	$5,1 \cdot 10^{-2}$

TAB. 5.2 – Valeurs maximales des nombres de Reynolds pour chaque granulométrie étudiée. (*) SiC préalablement chauffé à 310 °C.

Les résultats présentés ci-dessous sont uniquement traités à l'aide de l'équation (2.35) dont l'expression est rappelée ici :

$$\frac{\mu L}{S} \frac{Q_1 P_1}{\Delta P} = k_g(\infty) P_m + C$$

Afin de faciliter la présentation des résultats, seuls ceux obtenus pour les milieux poreux réalisés à partir des granulométries de SiC 18 et 30 μm seront détaillés, sachant que des résultats similaires et reproductibles ont été observés pour l'ensemble des granulométries étudiées : 5, 8, 30 (préalablement chauffé à 310°C) et 50 μm . L'ensemble des courbes expérimentales est disponible en annexe 1 de ce chapitre.

Granulométrie (μm)	$k_g(atm)$ (m^2)	ϕ
5	$4,63.10^{-14}$	0,57
8	$6,98.10^{-14}$	0,52
18	$1,41.10^{-13}$	0,46
30	$4,82.10^{-13}$	0,42
50	$1,46.10^{-12}$	0,43
30(*)	$7,10.10^{-13}$	0,47

TAB. 5.3 – *Caractéristiques initiales des différents milieux étudiés. (*) SiC préalablement chauffé à 310°C.*

Le tableau (5.3) résume l'ensemble des porosités et des perméabilités au gaz obtenues pour une valeur de la pression moyenne au sein du massif proche de la pression atmosphérique. Plus les grains de SiC sont gros, plus la porosité est faible et plus la perméabilité au gaz est élevée. Ce résultat est cohérent et évidemment attendu. En effet, plus les grains de SiC sont de petites tailles, plus leur tassage est rendu difficile, donc leur porosité s'en trouve d'autant plus augmentée. En outre, plus les grains sont de grandes tailles, plus les diamètres de pores sont grands et plus la perméabilité est élevée. Cela explique que la perméabilité et la porosité du milieu poreux de SiC 30 μm préalablement chauffé à 310 °C soient plus élevées que celles relatives au massif de SiC 30 μm non chauffé. En effet, les poudres de SiC utilisées dans cette étude ont été fabriquées par broyage, les différentes granulométries ont ensuite été obtenues par une méthode gravitaire. Lors de ce processus de fabrication, des poussières de SiC, communément nommées "fines", se déposent à la surface des grains. Lorsque le SiC est chauffé à 310°C, ces fines vont se lier à la surface des grains, ce qui a pour conséquence d'augmenter leur diamètre.

L'effet Klinkenberg a été mis en évidence sur un massif de SiC 30 μm (figure (5.3)). On voit clairement que la perméabilité au gaz est fonction de la pression moyenne au sein du milieu poreux. La perméabilité au gaz décroît jusqu'à une valeur asymptotique égale à la perméabilité intrinsèque en milieu sec.

Les figures (5.4) et (5.5) présentent respectivement les diagrammes de Klinkenberg pour les massifs de SiC de granulométrie 18 et 30 μm .

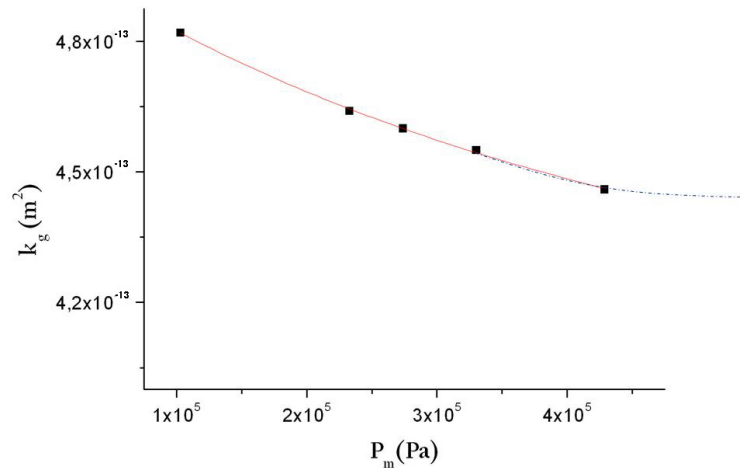


FIG. 5.3 – Mise en évidence de l'effet Klinkenberg. Massif de SiC 30 μm .

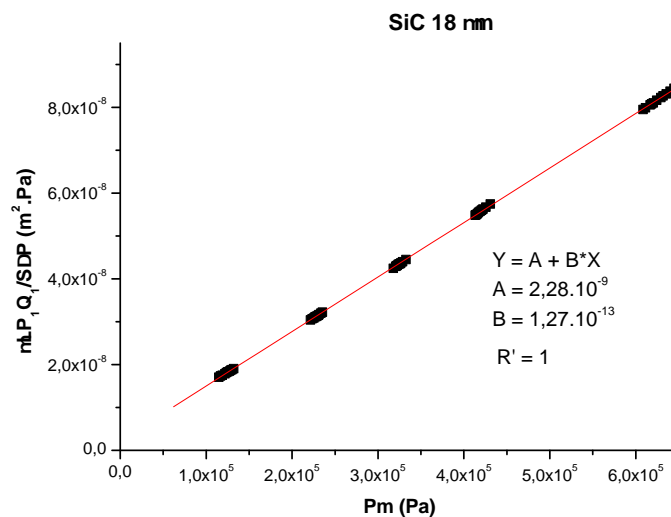


FIG. 5.4 – Évolution de $\mu L P_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm .

La régression linéaire, dont le coefficient de corrélation vaut 1, pour le massif de SiC 18 μm permet d'identifier la perméabilité au gaz pour une pression moyenne infinie (soit la perméabilité corrigée des effets Klinkenberg) et le coefficient de Klinkenberg, qui ont respectivement pour valeur $k_g(\infty) = 1,27.10^{-13} m^2$ et $C = 2,28.10^{-9} N$.

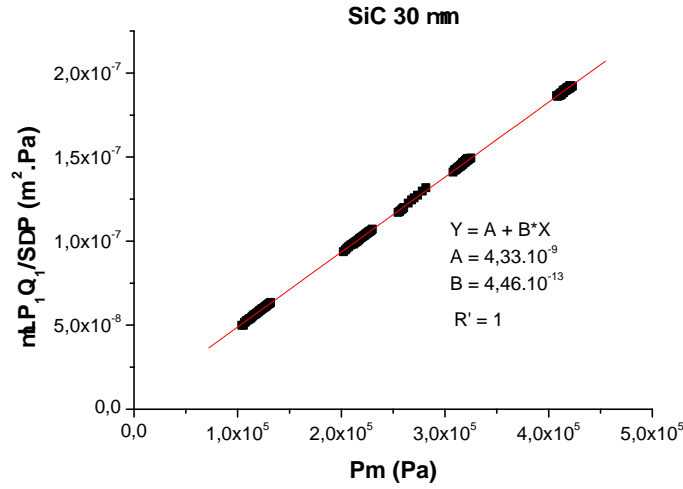


FIG. 5.5 – Évolution de $\mu LPQ_1/SDP$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm .

Pour le massif de SiC 30 μm , les valeurs suivantes ont été obtenues : $k_g(\infty) = 4,46 \cdot 10^{-13} m^2$ et $C = 4,33 \cdot 10^{-9} N$.

Afin de comparer les résultats obtenus sur les différents massifs, l'intensité de l'effet Klinkenberg peut être définie par l'équation suivante :

$$\kappa = \frac{k_g(atm) - k_g(\infty)}{k_g(\infty)} \quad (5.10)$$

Pour le massif de SiC 18 μm , κ est de 11 %, alors que pour celui de 30 μm il est de l'ordre de 8 %. Ces résultats font ressortir, comme prévu, que l'effet Klinkenberg est d'autant plus important que le massif est peu perméable. Un comportement similaire est observé pour l'ensemble des échantillons traités. Il est possible d'expliquer cette situation par le fait que l'effet Klinkenberg est dû aux chocs particule/paroi. En résumé, plus la perméabilité du milieu sera faible, plus la fréquence des chocs sera importante.

Détermination du diamètre de pore équivalent

En émettant l'hypothèse que les massifs de SiC sont composés d'un faisceau de tubes capillaires identiques, il est possible de déterminer deux expressions analytiques du diamètre de pore équivalent : soit proportionnel à $\sqrt{k_g(\infty)}$ (cf. éq. (5.11)), soit proportionnel à C (cf. éq. (5.12)).

$$d_e^{(k)} = 2\sqrt{\frac{8k_g(\infty)}{\phi}} \quad (5.11)$$

$$d_e^{(C)} = \frac{4C}{\xi\phi\mu} \sqrt{\frac{2M}{\pi RT}} \quad (5.12)$$

où ξ , M , R et T sont respectivement coefficient d'accomodation, la masse molaire, la constante des gaz parfaits et la température.

Calculs d'erreur sur $d_e^{(k)}$ et $d_e^{(C)}$

Pour estimer la précision sur les valeurs calculées à l'aide des relations (5.11) et (5.12) faisant intervenir $k_g(\infty)$ et C déterminées à partir des données expérimentales, nous avons estimé les erreurs sur les déterminations de $k_g(\infty)$ et C à partir des précisions de mesure attendues sur Q_1 , ΔP et P_2 . Pour ce faire, nous avons généré des séries de valeur de Q_1 , ΔP et P_2 tirées aléatoirement dans l'intervalle d'incertitude autour des valeurs mesurées de ces trois quantités. De chacune de ces séries de valeur, nous avons estimé $k_g(\infty)$ et C , permettant d'évaluer ainsi l'écart-type sur ces deux grandeurs. Enfin, à l'aide des relations (5.11) et (5.12), nous avons déduit l'intervalle d'erreur attendu sur $d_e^{(k)}$ et $d_e^{(C)}$. Cinquante séries de valeur Q_1 , ΔP et P_2 ont été utilisées pour cette procédure. La série des estimations de $k_g(\infty)$ et C pour le massif de SiC $5 \mu\text{m}$ est présentée ci-dessous à titre d'exemple.

$k_{N_2}(\infty) (m^2)$	$C (N)$	$k_{N_2}(\infty)$	$C (N)$	$k_{N_2}(\infty)$	$C (N)$
3,64.10 ⁻¹⁴	1,50.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,32.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,48.10 ⁻⁹
3,73.10 ⁻¹⁴	1,10.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,29.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,33.10 ⁻⁹
3,69.10 ⁻¹⁴	1,24.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,42.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,31.10 ⁻⁹
3,66.10 ⁻¹⁴	1,39.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,43.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,38.10 ⁻⁹
3,64.10 ⁻¹⁴	1,43.10 ⁻⁹	3,68.10 ⁻¹⁴	1,40.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,39.10 ⁻⁹
3,66.10 ⁻¹⁴	1,42.10 ⁻⁹	3,62.10 ⁻¹⁴	1,50.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,43.10 ⁻⁹
3,65.10 ⁻¹⁴	1,42.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,43.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,23.10 ⁻⁹
3,68.10 ⁻¹⁴	1,29.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,44.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,34.10 ⁻⁹
3,66.10 ⁻¹⁴	1,61.10 ⁻⁹	3,63.10 ⁻¹⁴	1,54.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,36.10 ⁻⁹
3,70.10 ⁻¹⁴	1,21.10 ⁻⁹	3,68.10 ⁻¹⁴	1,32.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,34.10 ⁻⁹
3,61.10 ⁻¹⁴	1,28.10 ⁻⁹	3,66.10 ⁻¹⁴	1,37.10 ⁻⁹	3,65.10 ⁻¹⁴	1,44.10 ⁻⁹
3,66.10 ⁻¹⁴	1,36.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,48.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,48.10 ⁻⁹
3,70.10 ⁻¹⁴	1,23.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,31.10 ⁻⁹		
3,67.10 ⁻¹⁴	1,30.10 ⁻⁹	3,67.10 ⁻¹⁴	1,34.10 ⁻⁹		
3,67.10 ⁻¹⁴	1,39.10 ⁻⁹	3,69.10 ⁻¹⁴	1,31.10 ⁻⁹		
3,66.10 ⁻¹⁴	1,37.10 ⁻⁹	3,66.10 ⁻¹⁴	1,42.10 ⁻⁹		
3,69.10 ⁻¹⁴	1,27.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,46.10 ⁻⁹		
3,67.10 ⁻¹⁴	1,35.10 ⁻⁹	3,64.10 ⁻¹⁴	1,40.10 ⁻⁹		
3,65.10 ⁻¹⁴	1,47.10 ⁻⁹	3,66.10 ⁻¹⁴	1,36.10 ⁻⁹		

TAB. 5.4 – Ensemble des résultats générés de $k_{N_2}(\infty)$ et C pour le massif de SiC $5 \mu\text{m}$.

D'après ces résultats, l'écart-type et les valeurs moyennes de $k_g(\infty)$ et C ont été calculés. Leurs valeurs respectives sont : $k_g(\infty)_{moyen} = 3,67.10^{-14}m^2$; $\sigma(k_g(\infty))/k_g(\infty) = 2,42.10^{-2}$ et $C_{moyen} = 1,38.10^{-9} N$; $\sigma(C)/C = 9,19.10^{-2}$.

Le tableau (5.5) résume l'ensemble des résultats obtenus lors de l'injection de gaz en milieu sec. Une bonne adéquation est mise en évidence d'une part entre $d_e^{(C)}$ et $d_e^{(k)}$ et d'autre part entre k_w et $k_g(\infty)$ (sauf pour le massif de SiC 05 μm , dont le tassage est sans doute moins bon dû à la petite taille des grains de SiC). De plus, les valeurs de $d_e^{(C)}$ et $d_e^{(k)}$ augmentent avec la granulométrie du SiC. Ce résultat était attendu car plus les grains sont gros, plus la taille des pores est importante.

Granulométrie	ϕ	k_w	$k_{N_2(\infty)} (m^2)$	$C (N)$	$d_e^{(C)}/d_e^{(k)}$	κ (%)
SiC (μm)		$(m^2) 10^{-13}$	10^{-13}	10^{-9}	(μm)	
5	0,57	0,23	0,37	1,4	1,2/1,2	26
8	0,52	0,59	0,59	1,7	1,9/1,9	19
18	0,46	1,28	1,27	2,3	3,0/3,0	10
30	0,42	4,21	4,46	4,3	5,7/5,7	8
50	0,43	14,5	14,5	5,9	10,4/10,4	1
30 (*)	0,47	6,60	6,83	5,3	6,7/6,7	4

TAB. 5.5 – Résumé des perméabilités, constantes, C , et diamètres de pore obtenus sur les différents massifs de SiC.

5.3.2 Massifs partiellement saturés en saumure

Dans un second temps, nous avons cherché à mettre en évidence l'influence éventuelle de la présence d'une saturation stationnaire en eau $S_w(Q_{1max})$ (on notera que l'eau est supposée immobile) sur les effets Klinkenberg préalablement mis en évidence sur les milieux secs (étapes 2-5 du protocole expérimental). Cette étude a porté sur deux massifs de granulométrie, 18 μm et 30 μm respectivement.

Tout comme l'étude réalisée sur les massifs secs, plusieurs expériences ont été effectuées sur la base de la procédure expérimentale décrite plus haut. Seuls les résultats obtenus pour du SiC 30 μm seront détaillés, sachant que des résultats similaires et reproductibles ont été observés sur des échantillons composés de SiC 18 μm . La totalité des courbes expérimentales est fournie en Annexe 2.

Des mesures de profils de saturation locale ont été réalisées par atténuation γ avant et après les mesures de perméabilité effective au gaz (à différentes contre-pressions P_2) pour s'assurer que le champ de saturation en saumure $S_w(Q_{1max})$ n'a pas ou peu été modifié au cours de l'expérience.

La figure (5.6) représente le champ de porosité obtenu par gammamétrie dont la valeur moyenne est égale à 0,43. Une valeur équivalente a été obtenue par bilans de masse fluide et solide, dont les valeurs respectives sont 0,42 et 0,41. En outre, la quasi linéarité de la courbe (l'écart maximum par rapport à la valeur moyenne est de 9,3%) permet de s'assurer que le milieu poreux non consolidé est bien homogène.

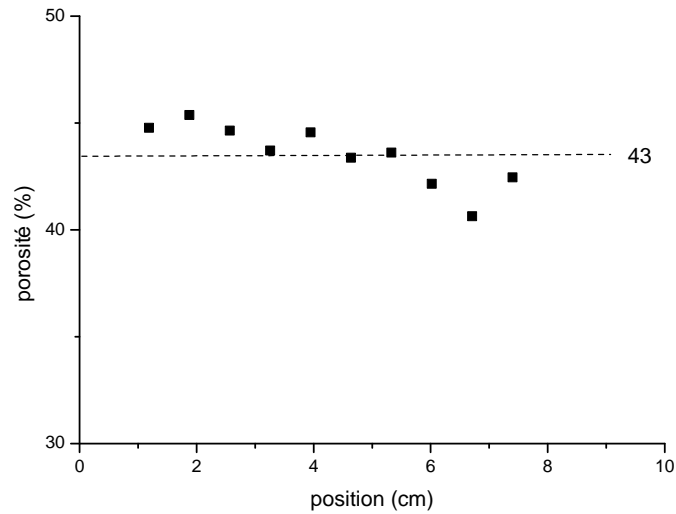


FIG. 5.6 – *Champ de porosité locale du milieu poreux composé de SiC 30 μm ; $\phi_\gamma = 0,43$; $L = 9,7$ cm et $D = 3,9$ cm.*

Deux exemples de champs de saturation locale en saumure pour les valeurs moyennes égales à 0,34 et 0,12 en début et en fin d'expérience (correspondant respectivement aux états initiaux et finaux) sont présentés en figure (5.7) pour le massif de SiC 30 μm . Ils montrent l'existence d'un gradient de saturation dans le sens d'injection (droite-gauche) dans les deux cas, ce dernier est dû à un balayage moins efficace et probablement à l'apparition de chemins préférentiels en sortie de milieu (20 points de saturation pour $S_w(Q_{1max}) = 0,34$ et 10 points de saturation pour $S_w(Q_{1max}) = 0,12$). Cette figure prouve également qu'aucune modification notable n'a eu lieu au cours des diverses expériences (déplacements d'eau, séchage, etc.).

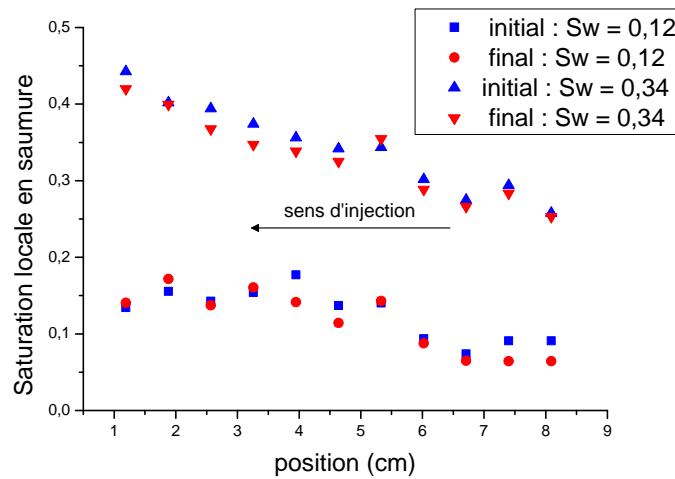


FIG. 5.7 – Champs de saturation locale en saumure pour les valeurs moyennes de $S_w(Q_{1max}) = 0,12$ et $0,34$.

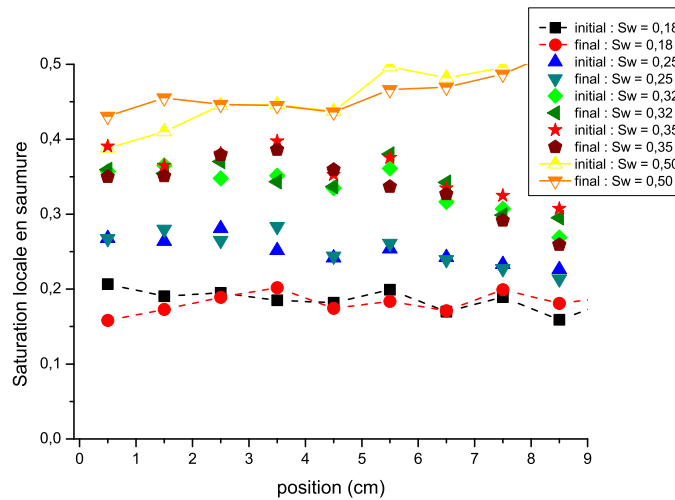


FIG. 5.8 – Champs de saturation locale en saumure du massif de SiC $18 \mu m$.

Un constat similaire est fait pour le milieu poreux de SiC $18 \mu m$. Cependant, le gradient de saturation observé est beaucoup moins prononcé (moins de 10 points de saturation dans tous les cas) comme l'indique la figure (5.8).

Au début de l'injection du gaz dans les milieux poreux, initialement saturés en saumure, l'eau est déplacée de l'entrée vers la sortie.

L'évolution des rapports $\mu L Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne P_m obtenus pour le milieu poreux constitué de SiC $30 \mu m$, possédant une saturation stationnaire

en eau $S_w(Q_{1max})$ égale à 0,34 et 0,12, est présentée respectivement sur les figures (5.9) et (5.10). En régime diphasique des difficultés expérimentales supplémentaires apparaissent telles que le séchage du milieu lors de l'écoulement de gaz ou l'atteinte d'un régime stationnaire. Ces difficultés se traduisent par une moins bonne linéarité de l'alignement des points expérimentaux.

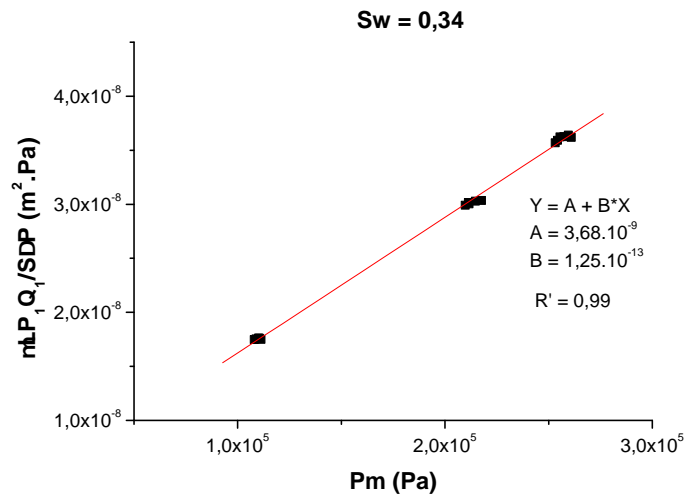


FIG. 5.9 – Évolution de $\mu L Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne P_m . Massif de SiC $30 \mu m$; $S_w(Q_{1max}) = 0,34$.

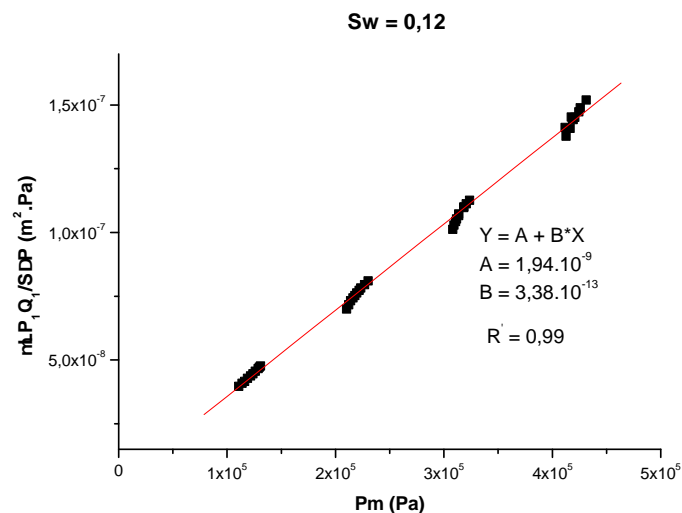


FIG. 5.10 – Évolution de $\mu L Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne P_m . Massif de SiC $30 \mu m$; $S_w(Q_{1max}) = 0,12$.

La régression linéaire, dont le coefficient de corrélation R' vaut 0,99, permet d'identifier la perméabilité effective au gaz $k_g(S_w(Q_{1max}), \infty)$ corrigée des effets Klinkenberg et la constante, $C(S_w(Q_{1max}))$. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

$S_w(Q_{1max})$	$k_g(S_w(Q_{1max}), \infty)$	$C(S_w(Q_{1max}))$
0,12	$3,38.10^{-13} m^2$	$1,94.10^{-9} N$
0,34	$1,25.10^{-13} m^2$	$3,68.10^{-8} N$

TAB. 5.6 – Valeurs des perméabilités effectives au gaz corrigées des effets Klinkenberg et des constantes, $C(S_w(Q_{1max}))$, pour les valeurs de saturation 0,12 et 0,34. Massif de SiC 30 μm .

Le pourcentage de Klinkenberg κ correspondant aux saturations stationnaires 0,34 et 0,12 est respectivement égal à 17,5 % et 8 %.

Les expériences effectuées sur du SiC de granulométrie 30 μm ont été réalisées sur deux milieux différents nommés massif 1 ($k_w = 4,21.10^{-13} m^2$; $\phi = 0,42$) et massif 2 ($k_w = 5,55.10^{-13} m^2$; $\phi = 0,44$) dont les perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation stationnaire sont résumées en figure (5.11). Ce diagramme montre une évolution générale équivalente. Les difficultés liées aux caractères diphasique des écoulements et non consolidé des massifs peuvent expliquer les résultats obtenus à fortes saturations.

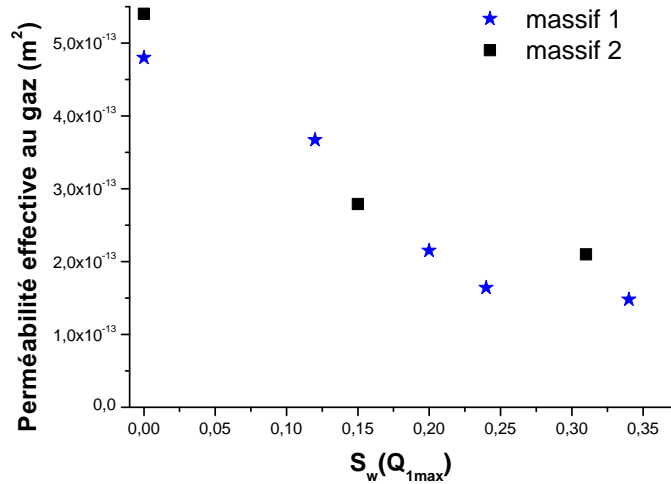


FIG. 5.11 – Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation en saumure. Massifs de SiC 30 μm .

Les valeurs numériques des perméabilités effectives au gaz des massifs 1 et 2 sont présentées dans les tableaux (5.7) et (5.8).

$S_w(Q_{1max})$	$k_g(S_w(Q_{1max}, atm)) (m^2)$
0	$4,82 \cdot 10^{-13}$
0,12	$3,67 \cdot 10^{-13}$
0,20	$2,15 \cdot 10^{-13}$
0,24	$1,64 \cdot 10^{-13}$
0,34	$1,48 \cdot 10^{-13}$

TAB. 5.7 – Perméabilités effectives au gaz en fonction de la valeur de saturation stationnaire : Massif 1.

$S_w(Q_{1max})$	$k_g(S_w(Q_{1max}, atm)) (m^2)$
0	$5,40 \cdot 10^{-13}$
0,15	$2,79 \cdot 10^{-13}$
0,31	$2,10 \cdot 10^{-13}$

TAB. 5.8 – Perméabilités effectives au gaz en fonction de la valeur de saturation stationnaire : Massif 2.

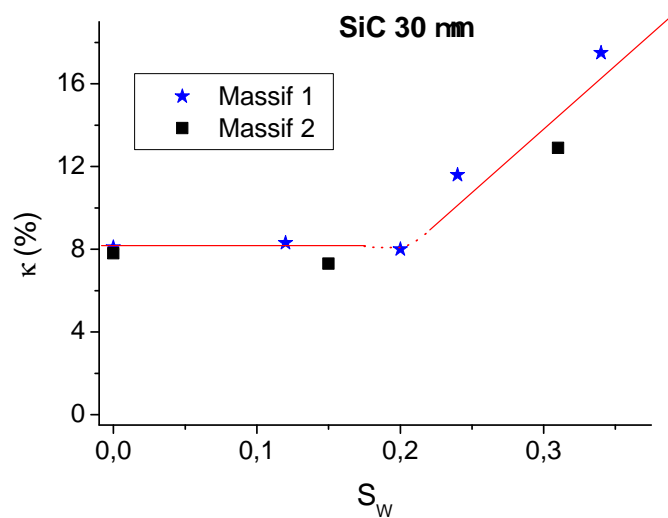


FIG. 5.12 – Évolution de κ en fonction de $S_w(Q_{1max})$. Massifs de SiC 30 μm .

L'ensemble des résultats obtenus est résumé en figure (5.12). Ce diagramme met en évidence l'existence d'une zone de transition en deçà de laquelle l'effet Klinkenberg est peu affecté par la présence d'eau et au delà de laquelle elle varie quasi-linéairement avec $S_w(Q_{1max})$. Ce résultat est en accord avec des observations récentes (Li et Horne, 2004) sur des massifs consolidés de grès de Berea. Un tel comportement

peut s'expliquer par la répartition de l'eau au sein du milieu poreux. A faibles saturations, l'eau est probablement distribuée sous forme pendulaire, alors qu'à fortes saturations, l'eau serait distribuée sous forme de film continu. La présence de ce dernier diminue la section efficace disponible pour le passage du gaz, donc augmente l'intensité de l'effet Klinkenberg.

Un résultat similaire à celui présenté pour le milieu poreux de SiC $30 \mu m$ a été obtenu pour le massif de SiC $18 \mu m$ dont les évolutions de la perméabilité effective au gaz et de κ en fonction de la saturation sont présentées sur les figures (5.13) et (5.14) ci-dessous.

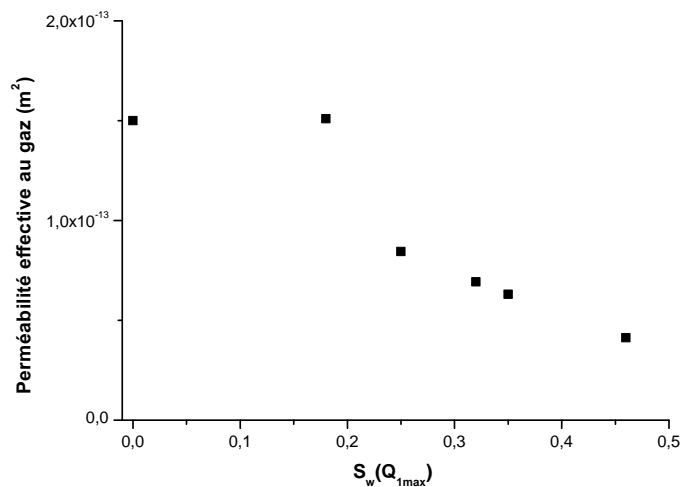


FIG. 5.13 – *Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation en saumure. Massif de SiC $18 \mu m$.*

Comme attendu, la figure (5.13) montre que la perméabilité effective au gaz diminue quand la saturation stationnaire en eau augmente. Le tableau (5.9) donne les valeurs numériques.

$S_w(Q_{1max})$	$k_g(S_w(Q_{1max}, atm)) (m^2)$
0	$1,50 \cdot 10^{-13}$
0,18	$1,51 \cdot 10^{-13}$
0,25	$8,44 \cdot 10^{-14}$
0,32	$6,92 \cdot 10^{-14}$
0,35	$6,30 \cdot 10^{-14}$
0,46	$4,13 \cdot 10^{-14}$

TAB. 5.9 – *Valeurs numériques des perméabilités effectives au gaz pour différentes saturations en eau. Massif de SiC $18 \mu m$.*

De nouveau, la figure (5.14) met en évidence l'existence de deux régimes d'évolution de κ en fonction de la saturation en eau. Un premier régime pour lequel l'intensité de l'effet Klinkenberg reste constante et un second régime pour lequel κ augmente avec la saturation en eau.

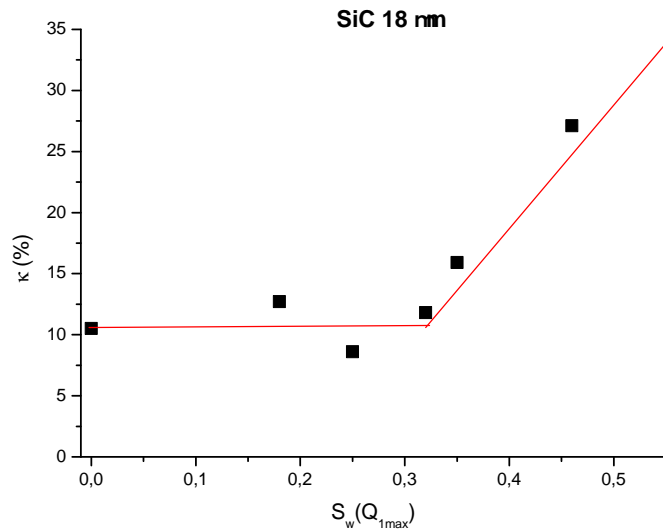


FIG. 5.14 – Évolution de l'effet Klinkenberg en fonction de la saturation en saumure. Massif de SiC 18 μm .

5.3.3 Massifs partiellement saturés en présence de polymère

Une solution de polymère (polyacrylamide neutre) a été injectée (étapes 6 à 9 du protocole expérimental) dans un massif constitué de SiC 30 μm , afin d'étudier l'influence du polymère sur l'effet Klinkenberg (étapes 10 à 11 du protocole expérimental).

Adsorption du polymère

Au cours des injections de la saumure de concentration 10 $g.l^{-1}$ (initialement les massifs sont saturés avec une solution de concentration 5 $g.l^{-1}$) et de la solution de polymère, les effluents ont été récupérés puis respectivement analysés par densimétrie et par viscosimétrie afin d'obtenir les fronts de sel et de polymère. La figure (5.15) présente ces deux fronts pour le massif de SiC 30 μm . Le retard observé pour le front de polymère provient de l'adsorption de ce dernier dans le milieu poreux. Le taux d'adsorption du polymère mesuré est égal à 115 $\mu g.g^{-1}$. Cette valeur s'inscrit dans la suite logique des expériences réalisées sur des milieux similaires (Broseta *et al.*, 1995; Broseta et Medjahed, 1994; Chauveteau *et al.*, 2001). La réduction de mobilité a été déterminée à différents taux de cisaillement, sa valeur au plateau newtonien est d'environ 10,5 (cf. FIG. 5.17).

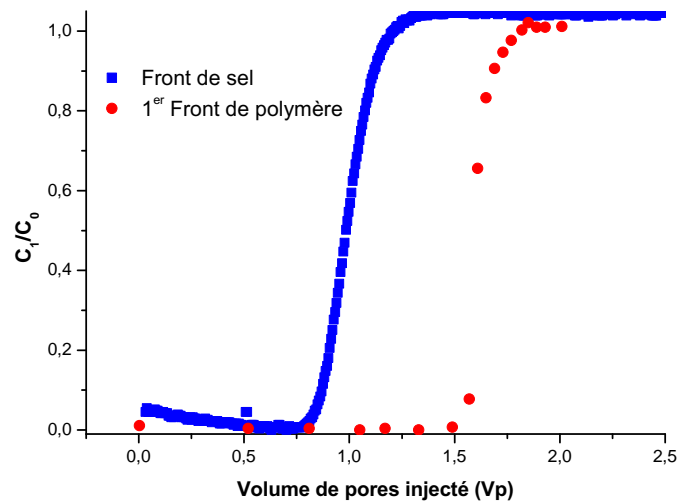


FIG. 5.15 – *Mesure de l'adsorption du polymère par retard du front de polymère par rapport au front de sel utilisé comme traceur. Massif de SiC 30 μm .*

Après le déplacement du polymère non absorbé par une solution de saumure, une nouvelle injection de polymère a été effectuée afin de déterminer le volume de pores exclu à la solution de polymère. La figure (5.16) présente le front de saumure et le second front de polymère. Ce résultat montre que ce volume est négligeable. En d'autres termes, le polymère s'est adsorbé sur l'ensemble du réseau poreux.

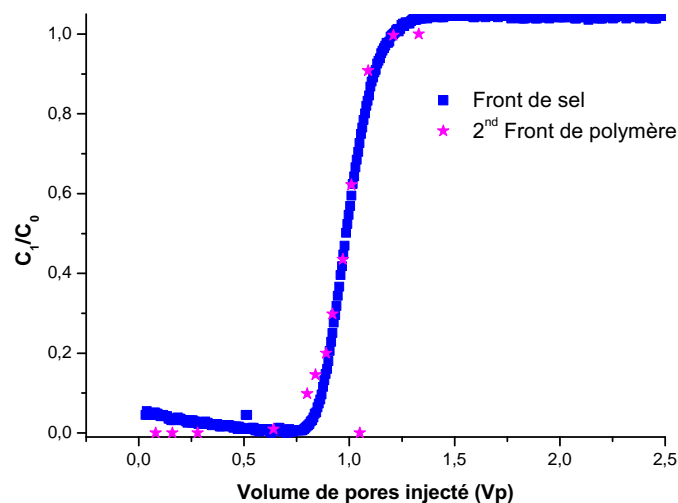


FIG. 5.16 – *Comparaison entre le second front de polymère et le front de sel utilisé comme traceur. Massif de SiC 30 μm .*

Après déplacement de la solution de polymère par injection de saumure, la réduction de perméabilité au plateau newtonien est d'environ 2,8 (cf. fig. (5.17)).

L'épaisseur hydrodynamique de la couche de polymère adsorbé peut être déduite de la mesure de la réduction de perméabilité, R_{kw} . En supposant que le rayon de pore effectif ou hydrodynamique, R_p , est réduit par une couche de polymère impénétrable d'épaisseur ε_h , on a :

$$\varepsilon_h = R_p(1 - R_{kw}^{-0,25}) \quad (5.13)$$

Dans le cas présent, la valeur de ε_h est égale à $0,68 \mu m$, laquelle est un peu élevée comparée à la valeur du rayon de giration du polyacrylamide neutre valant $0,16 \mu m$ (Broseta et Medjahed, 1994; Tabary, 2004). Il est possible que les grilles de nylon disposées aux extrémités du massif aient été partiellement obstruées par des grains de SiC, d'où une rétention de polymère surestimée et une augmentation artificielle de la perte de charge mesurée.

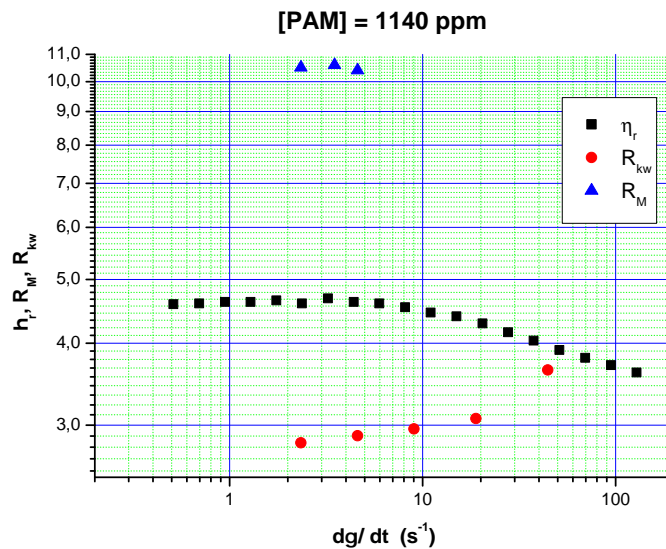


FIG. 5.17 – Mesure de la réduction de mobilité et de perméabilité à la saumure dans un massif de SiC $30 \mu m$ et du comportement rhéologique de la solution de polyacrylamide à $30^\circ C$.

Perméabilité effective au gaz à différentes contre-pressions

Comme précédemment, les perméabilités effectives au gaz ont été déterminées pour différentes valeurs de pression moyenne afin d'en déduire l'influence de la présence du polymère sur l'effet Klinkenberg. Des mesures d'atténuation gamma ont été réalisées en début et en fin d'expérience pour chaque saturation stationnaire en eau afin de

s'assurer que l'état de saturation est resté constant. Les résultats obtenus étant similaires et reproductibles pour l'ensemble des saturations, seules quelques unes d'entre elles ont été détaillées. L'ensemble des diagrammes et résultats est donné en Annexe 3.

Les champs de saturation locale en saumure présentés sur la figure (5.18) montrent l'existence d'un gradient de saturation au sein du massif dans le sens de l'injection (droite/gauche). Ce pied capillaire est certainement dû à un balayage du gaz moins efficace en sortie de massif (formation de chemins préférentiels). Néanmoins, la présence de polymère tend à atténuer ce pied capillaire. Ces résultats mettent également en évidence qu'aucune modification significative du champ de saturation n'a eu lieu (déplacements d'eau, mouvement de grain de SiC, séchage, etc.).

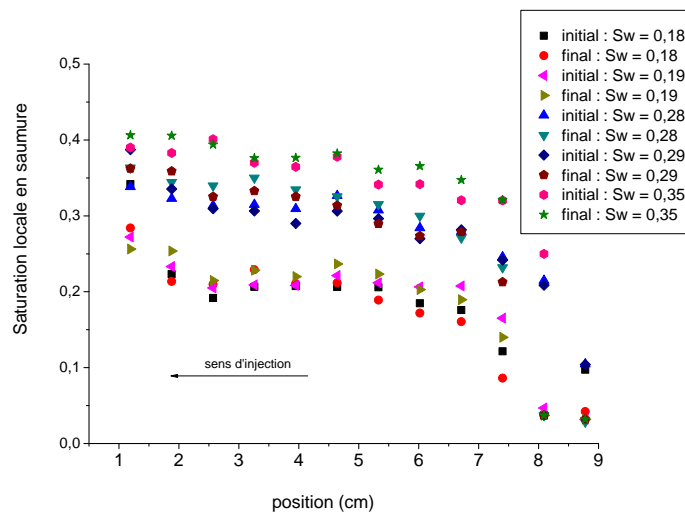


FIG. 5.18 – *Champs de saturation locale en saumure à différentes valeurs moyennes en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm . Etats de saturation relevés en début et en fin d'expérience.*

Pour obtenir un nombre suffisant de paliers de saturation, le milieu poreux a été saturé avant chaque remise en gaz. Contrairement à l'étape de saturation initiale sur les massifs secs, il n'y a pas eu d'injection de CO_2 avant l'injection de saumure. Le dioxyde de carbone en solution dans l'eau forme un acide faible qui peut réagir avec les fonctions amines (bases faibles) du polymère et ainsi dégrader prématurément les macromolécules adsorbées. Par conséquent, la resaturation a été faite par injection d'une solution de saumure, en présence d'une contre-pression en sortie de 3-4 bar, solution préalablement dégazée sous vide et stockée sous Hélium.

Les résultats obtenus pour le SiC 30 μm aux saturations en saumure égales à 0,18 et 0,35 sont respectivement présentés sur les figures (5.19) et (5.20). On notera sur ces graphiques les très bonnes corrélations obtenues sur la linéarité entre $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ et P_m ($R' = 0,99$).

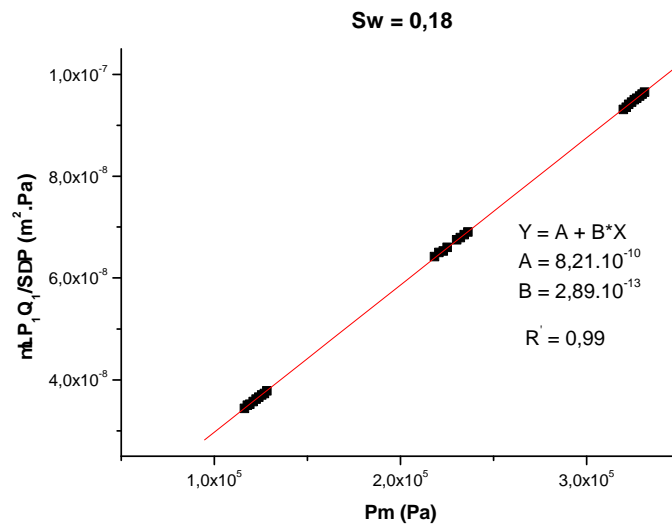


FIG. 5.19 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm ; $S_w = 0,18$.

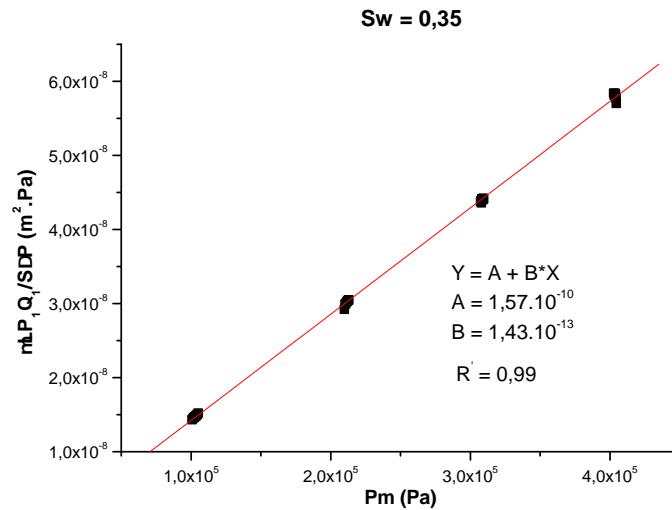


FIG. 5.20 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm ; $S_w = 0,35$.

La régression linéaire permet d'identifier la perméabilité effective au gaz $k_g(S_w(Q_{1max}), \infty)$ corrigée de l'effet Klinkenberg et la constante $C(S_w(Q_{1max}))$. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

$S_w(Q_{1max})$	$k_{N_2}(S_w(Q_{1max}, \infty))$	$C(S_w(Q_{1max}))$
0,18	$2,89.10^{-13} m^2$	$8,21.10^{-10} N$
0,35	$1,43.10^{-13} m^2$	$1,57.10^{-10} N$

TAB. 5.10 – Valeurs des perméabilités effectives au gaz et des coefficients de Klinkenberg pour les valeurs de saturation 0,18 et 0,35. Massif de SiC 30 μm en présence de polymère adsorbé.

L'intensité de l'effet Klinkenberg κ correspondant aux saturations stationnaires 0,18 et 0,35 est respectivement égal à 0 et 1 %.

D'après ces observations, la présence de polymère adsorbé au sein du milieu poreux semble diminuer fortement l'effet Klinkenberg. Ce résultat a été confirmé sur plusieurs expériences similaires, dont les données expérimentales sont résumées en Annexe 3. Deux propositions de conjecture peuvent permettre d'expliquer ce résultat :

- soit la solution de polymère a obstrué les pores de petite taille contribuant majoritairement à l'effet Klinkenberg (chocs paroi/particule) ;
- soit deux phénomènes opposés en compétition avec prééminence du second apparaissent : (i) diminution de la section efficace de pore due à la présence de la couche de polymère adsorbé (augmentation de l'effet Klinkenberg) et (ii) diminution de l'absorption d'énergie des chocs paroi/particule due à la présence des macromolécules (diminution de l'effet Klinkenberg).

Ces dernières conjectures sont cependant très probablement insuffisantes pour expliquer l'effet observé. En effet, la topologie de la surface porale et la mobilité de l'eau ont été complètement modifiées par la présence du polymère, modifiant ainsi la dépendance attendue de l'effet Klinkenberg vis-à-vis de la perméabilité.

5.3.4 Comparaison des résultats

Dans cette section sont comparés les résultats pour les écoulements diphasiques décrits dans les deux sections précédentes. En effet, si la présence d'une couche de polymère adsorbé réduit significativement la perméabilité à l'eau, qu'en est-il de la perméabilité effective au gaz et de la saturation stationnaire en eau ?

Le tableau (5.11) résume l'ensemble des résultats obtenus sur des massifs de SiC 30 μm avant et après traitement par une solution de polymère. A conditions expérimentales équivalentes, ce bilan fait ressortir :

- une augmentation de la saturation stationnaire en eau en présence de polymère. La solution de polymère étant hydrophile, cela a pour conséquence d'augmenter la rétention d'eau ;

- une réduction sélective de perméabilité ($R_{kw} = 2,8$ et $R_{kN_2} \simeq 1,4$). Au passage du gaz, il est très probable que la couche de polymère adsorbé soit écrasée à la paroi ce qui n'est pas le cas lors des écoulements d'eau (cf. section 4.2.4).

$S_w(Q_{1max})$	$k_g(atm) (m^2)$	$Q_{1max} (m^3 \cdot s^{-1})$	Milieu poreux
0,12	$3,67 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	Avant polymère
0,15	$2,79 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	Avant polymère
0,20	$2,15 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Avant polymère
0,24	$1,64 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	Avant polymère
0,31	$2,10 \cdot 10^{-13}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	Avant polymère
0,34	$1,48 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	Avant polymère
0,18	$2,89 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	Après polymère
0,30	$1,96 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	Après polymère
0,35	$1,43 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	Après polymère

TAB. 5.11 – Valeurs de $S_w(Q_{1max})$, $k_g(atm)$ et Q_{1max} en l'absence et en présence de polymère pour des milieux poreux de SiC $30 \mu m$.

La comparaison des champs de saturation locale en saumure d'un massif de SiC $30 \mu m$ avant et après adsorption de polymère (Fig. 5.21) montre que le polymère a tendance à homogénéiser la répartition de la saumure dans le milieu poreux.

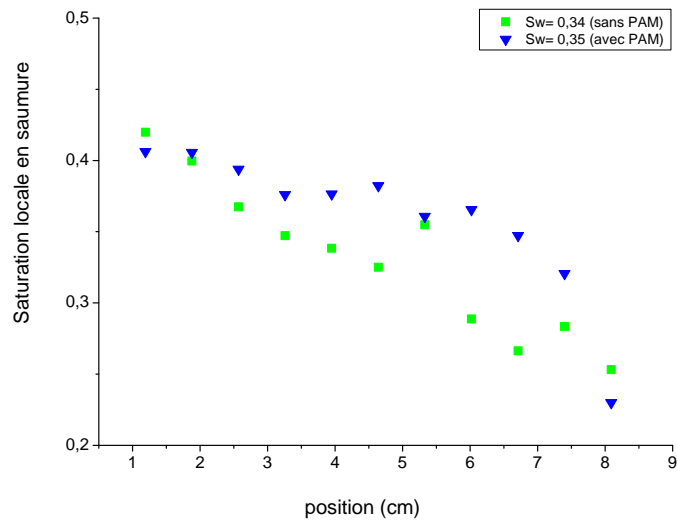


FIG. 5.21 – Influence du polymère sur la répartition de l'eau - Massifs de SiC $30 \mu m$.

5.4 Conclusions

Ce chapitre a porté sur l'étude de l'influence d'une couche de polymère adsorbé sur l'effet Klinkenberg. Pour cela, des écoulements ont été réalisés sur des massifs secs, partiellement saturés en saumure en l'absence et en présence d'une couche de polymère adsorbé. Dans la littérature, il est possible de trouver beaucoup de travaux de recherche traitant de l'effet Klinkenberg sur des massifs secs et occasionnellement sur des milieux partiellement saturés, mais aucun jusqu'à présent n'a porté sur des milieux partiellement saturés en présence d'une couche de polymère adsorbé.

Pour les écoulements monophasiques de gaz en milieu poreux sec, il a été possible d'estimer les diamètres de pore équivalent de deux manières indépendantes : à partir de $k_g(\infty)$ d'une part, et à partir de C d'autre part en s'appuyant sur un modèle classique de faisceau de tubes capillaires. Une très bonne cohérence entre ces valeurs ($d_e^{(k)}/d_e^{(C)}$) a été obtenue. Il a été confirmé que l'effet Klinkenberg était directement lié à la perméabilité du milieu : plus celle-ci est faible, plus l'effet Klinkenberg est important. Ce résultat est attendu dans la mesure où l'effet Klinkenberg est directement lié aux chocs paroi/particule : les pores de plus petites tailles (perméabilités faibles) présentent donc des probabilités de chocs plus importantes.

Ensuite, pour les écoulements diphasiques gaz/eau les résultats montrent que l'influence de la saturation stationnaire en eau sur l'effet Klinkenberg dépend de la quantité d'eau présente. Deux régimes ont été mis en évidence : à faibles saturations en saumure, le coefficient de Klinkenberg est constant ; tandis qu'à fortes saturations, le coefficient de Klinkenberg augmente de manière quasi-linéaire. Dans ce dernier cas, ce phénomène peut s'expliquer par la réduction de la perméabilité effective au gaz.

Pour finir, de nouveaux essais ont été réalisés sur des écoulements diphasiques gaz/eau en présence de polymère adsorbé sur des massifs de SiC $30 \mu m$. Le traitement au polymère a pour conséquence de diminuer fortement la perméabilité à l'eau tout en laissant celle au gaz peu modifiée. Les coefficients de réduction de perméabilité à l'eau et au gaz, dont les valeurs respectives sont 2,8 et 1,4, montrent que le polymère provoque une réduction sélective de perméabilité. Un autre aspect intéressant de la présence du polymère est sa capacité à homogénéiser le champ de saturation en saumure à l'intérieur du milieu poreux.

En outre, il s'avère que la présence d'une faible quantité de polymère adsorbé a pour conséquence de réduire de façon importante l'effet Klinkenberg. Trois conjectures sont proposées pour interpréter cette observation :

- la solution de polymère a obstrué les pores de petite taille, ce qui se traduit par une diminution de chocs aux parois. Cette hypothèse est sans doute insuffisante compte tenu du caractère relativement monodisperse de la taille de pores des massifs de SiC ;
- deux phénomènes entrent en opposition dont le second aura prédominance : la diminution de la section efficace de pore par le polymère adsorbé (accroissement

- de l'effet Klinkenberg) et l'absorption de l'énergie des chocs paroi/particule par les macromolécules (décroissement de l'effet Klinkenberg) ;
- la topologie de l'espace poral a été complètement modifiée par la présence du polymère modifiant ainsi la dépendance attendue de l'effet Klinkenberg vis-à-vis de la perméabilité.

L'ensemble des travaux de ce chapitre complète les connaissances actuelles dans ce domaine. Néanmoins, les résultats demandent à être confirmés par des essais supplémentaires, particulièrement sur les écoulements en présence de polymère en milieu poreux naturel.

5.5 Annexe 1 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC sec

MASSIFS DE SiC DE 5, 8, 18, 30 ET 50 μm

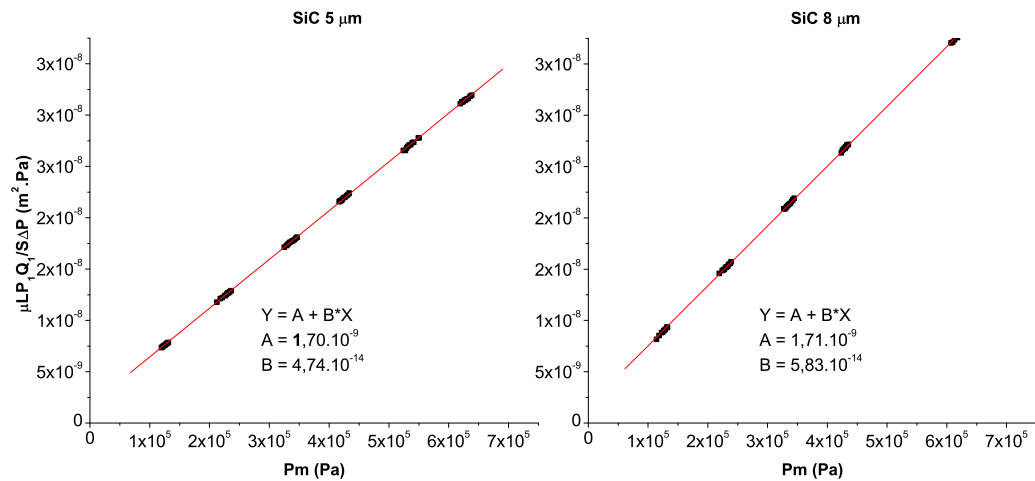


FIG. 5.22 – Évolution de $\mu\text{LP}_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massifs de SiC 5 et 8 μm .

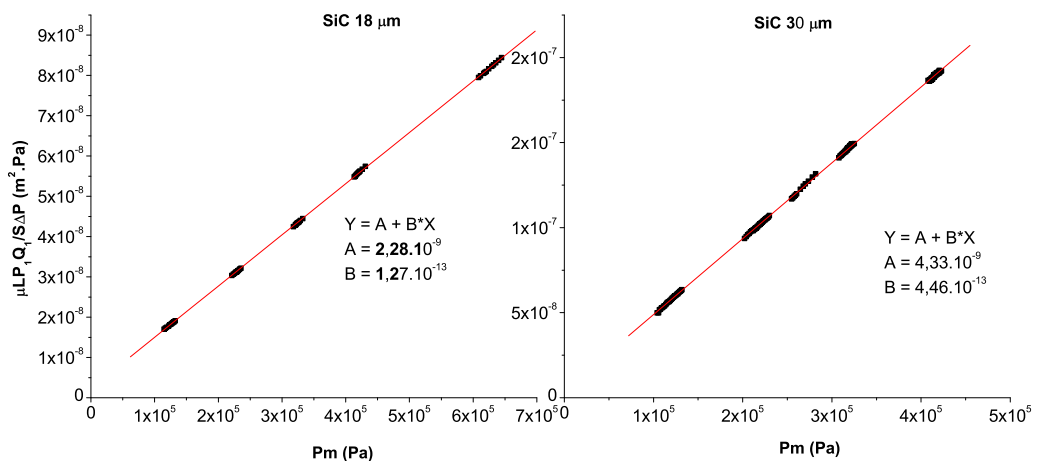


FIG. 5.23 – Évolution de $\mu\text{LP}_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massifs de SiC 18 et 30 μm .

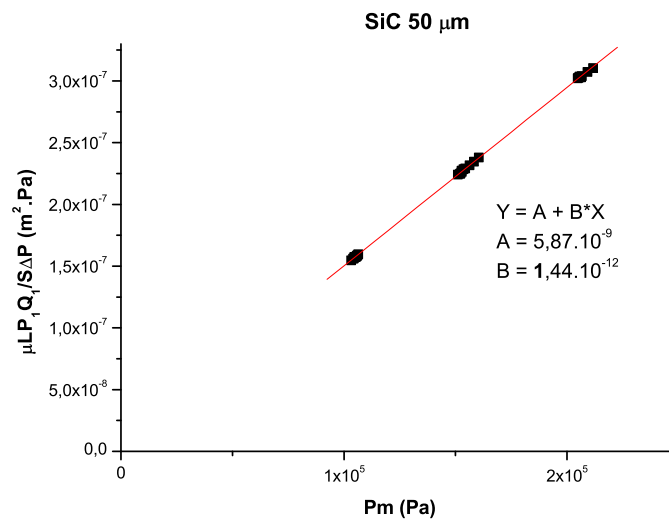


FIG. 5.24 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 50 μm.

5.6 Annexe 2 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC à différentes $S_w(Q_{1max})$

MASSIFS DE SiC 30 μm À DIFFÉRENTS $S_w(Q_{1max})$

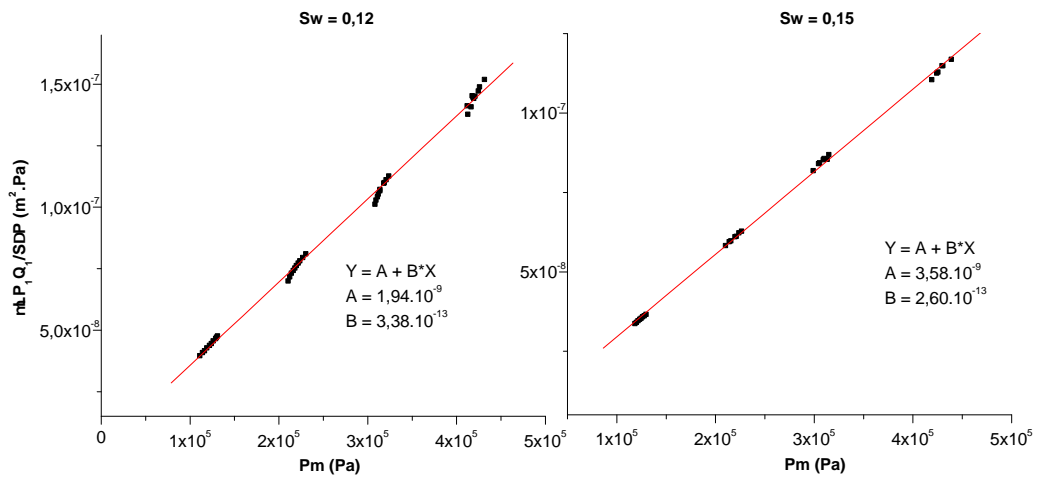


FIG. 5.25 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,12$ et $0,15$.

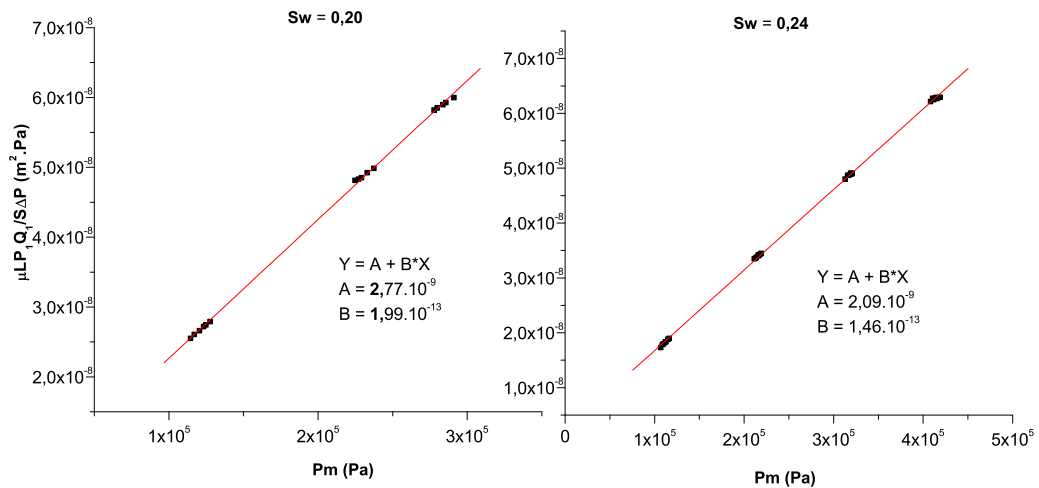


FIG. 5.26 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,20$ et $0,24$.

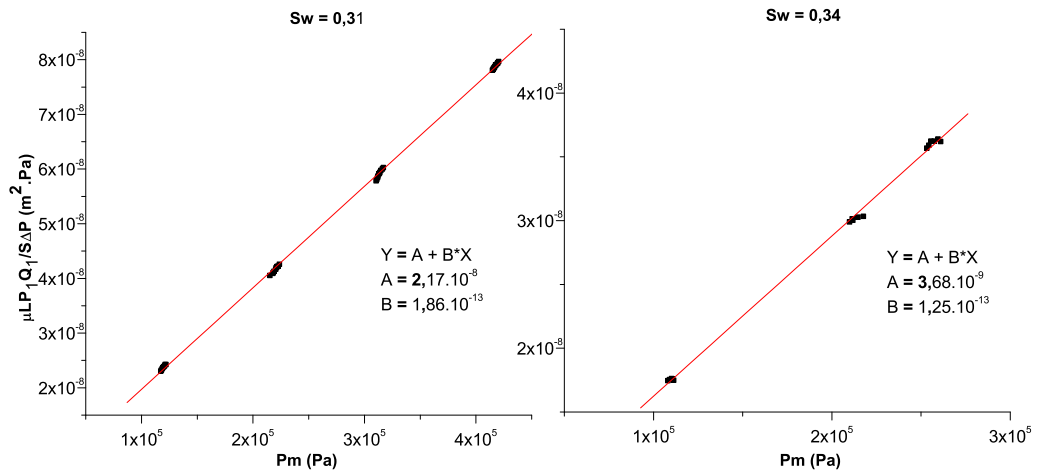


FIG. 5.27 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,31$ et $0,34$.

CHAMPS DE SATURATION LOCALE DES MASSIFS DE SiC 30 μm

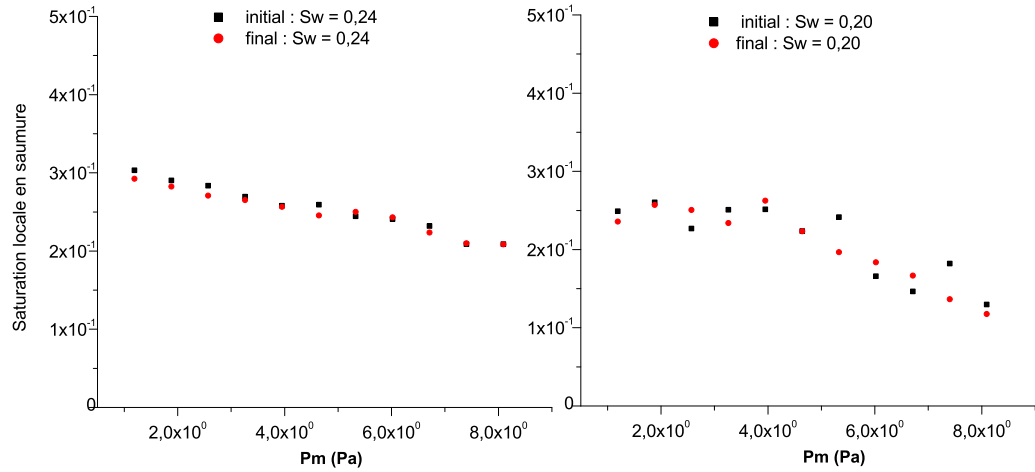


FIG. 5.28 – Champs de saturation locale. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,20$ et $0,24$.

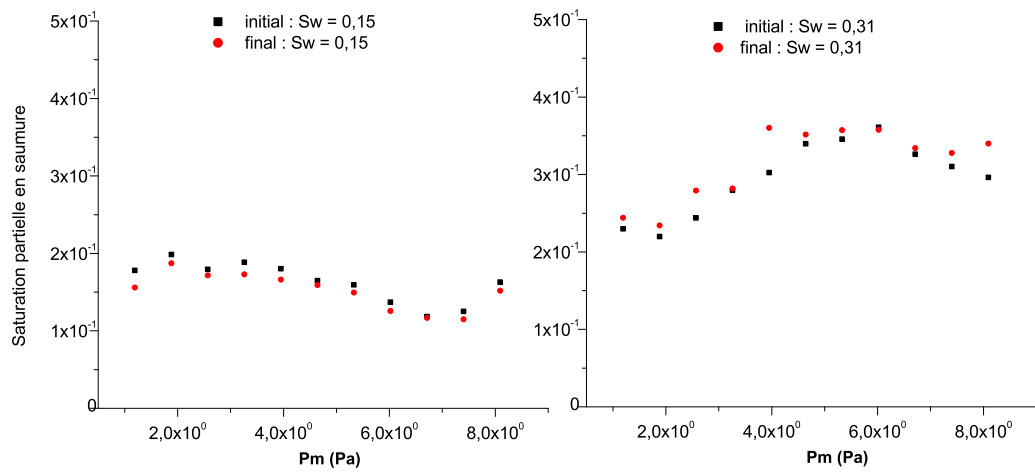


FIG. 5.29 – Champs de saturation locale. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,15$ et $0,31$.

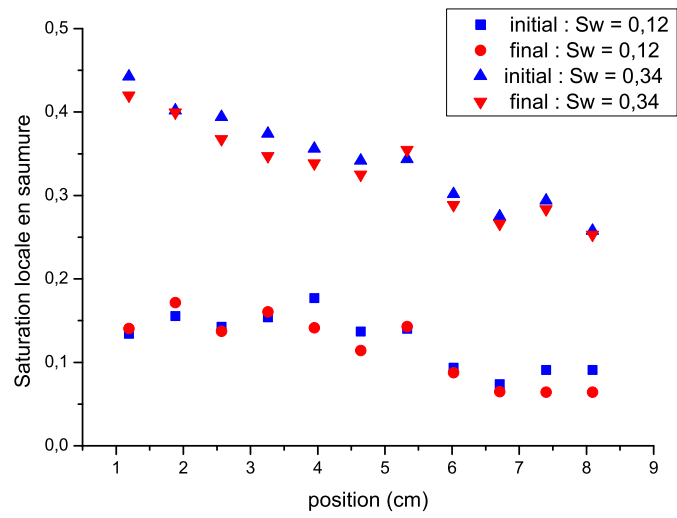


FIG. 5.30 – Champs de saturation locale. Massif de SiC $30 \mu m$; $S_w(Q_{1max}) = 0,12$ et $0,34$.

MASSIFS DE SiC 18 μm À DIFFÉRENTS $S_w(Q_{1\text{max}})$: EFFET KLINKENBERG ET CHAMPS DE SATURATION LOCALE

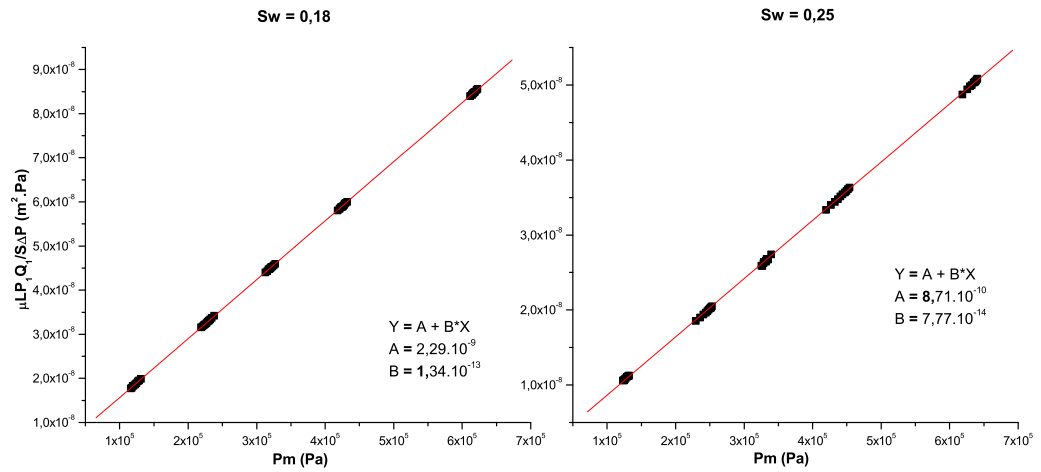


FIG. 5.31 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,18$ et $0,25$.

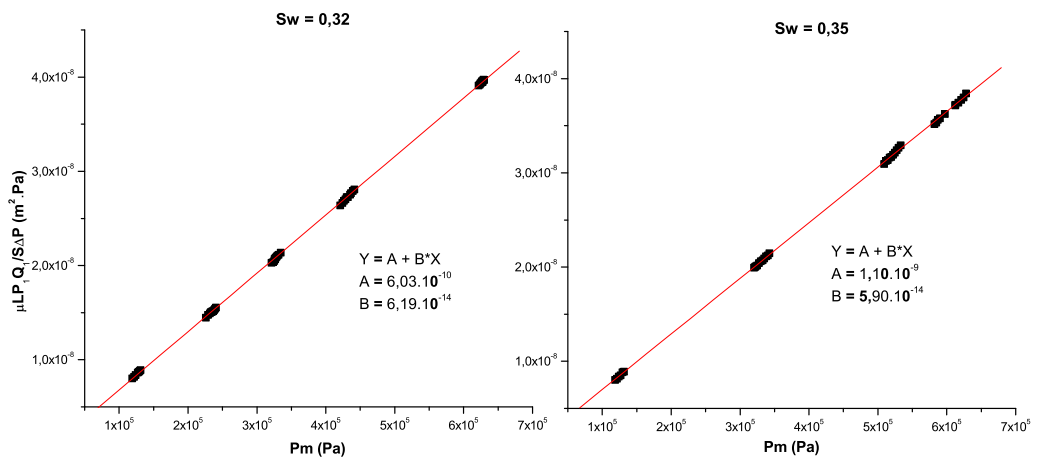


FIG. 5.32 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,32$ et $0,35$.

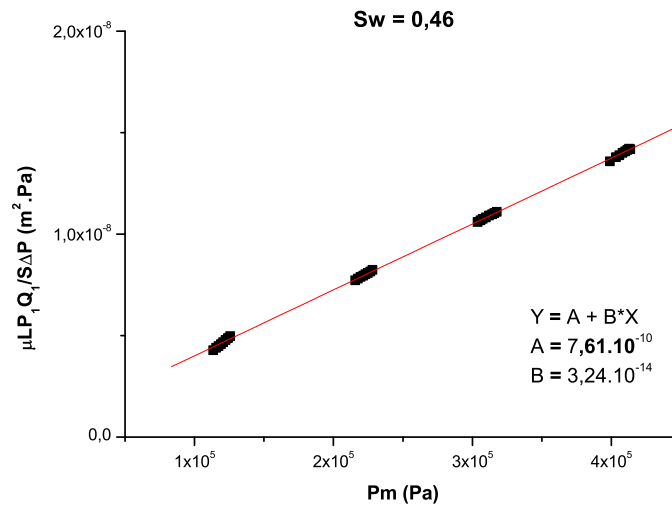


FIG. 5.33 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,46$.

5.7 Annexe 3 : Effet Klinkenberg sur des massifs de SiC en présence de PAM

MASSIFS DE SiC 30 μm À DIFFÉRENTS $S_w^{(P)}(Q_{1\text{max}})$

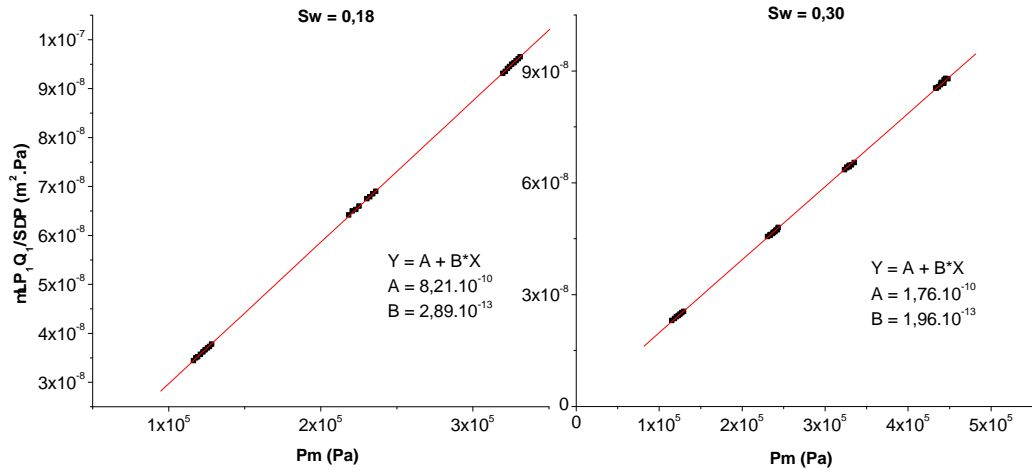


FIG. 5.34 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif SiC 30 μm avec PAM; $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,18$ et $0,30$.

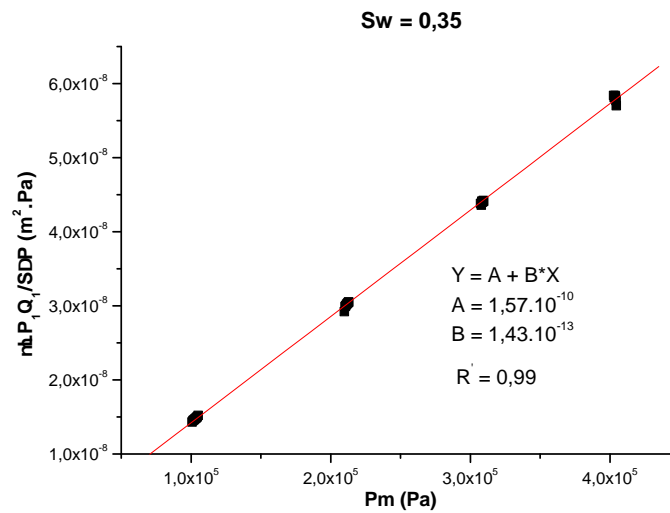


FIG. 5.35 – Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif SiC 30 μm avec PAM; $S_w(Q_{1max}) = 0,35$.

CHAMPS DE SATURATION LOCALE DU MASSIF DE SiC 18 μm

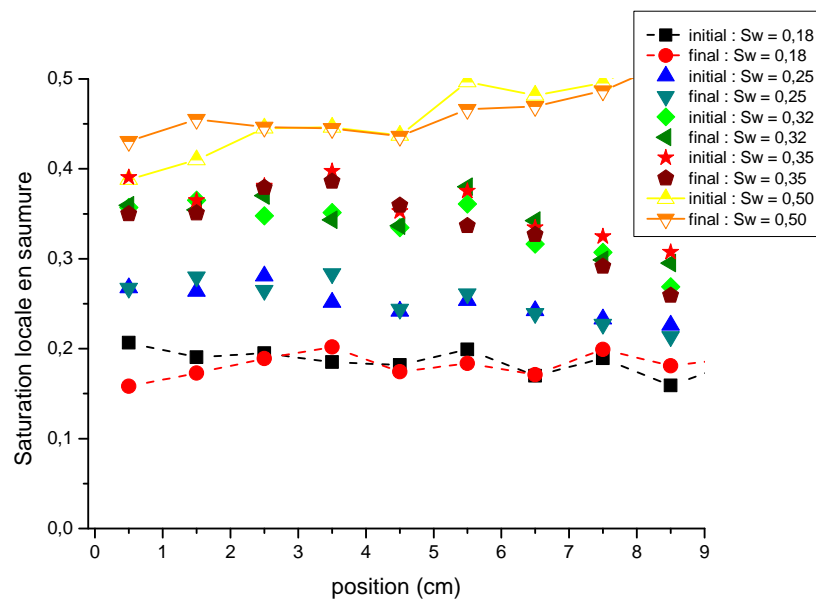


FIG. 5.36 – Champs de saturation locale. Massif de SiC 18 μm

Chapitre 6

Étude expérimentale de l'influence d'une couche de polymère adsorbé sur les effets inertiels

Dans ce chapitre, nous poursuivons l'étude de l'impact d'une couche de polymère adsorbé sur les propriétés d'écoulement gaz/eau en milieu poreux en couvrant une gamme de nombre de Reynolds suffisamment grande pour appréhender les effets inertiels. Les pressions moyennes élevées auxquelles sont réalisées ces expériences permettent d'être sûr que l'effet Klinkenberg ne perturbe pas les mesures et que seuls les effets inertiels sont à l'origine des phénomènes non-linéaires. Ces derniers sont particulièrement importants et non négligeables aux abords des puits à gaz où les débits sont extrêmement élevés. Une diminution des effets inertiels permettrait en principe d'améliorer la productivité de ces puits. En dépit d'une littérature relativement abondante sur les effets de l'adsorption de polymère sur les écoulements diphasiques en milieu poreux (Zaitoun *et al.*, 1991; Li et Horne, 2004), aucun travail visant à étudier ces effets dans le cas des écoulements inertiels gaz/eau n'a été, à notre connaissance, effectué en dehors d'un travail préliminaire de thèse (Elmkies, 2001). La présente étude s'inscrit dans la continuité de cette dernière référence.

Le modèle physique retenu pour décrire ce type d'écoulement est le modèle de Darcy-Forchheimer. Pour réaliser cette étude, nous procédons dans un premier temps à une expérimentation en milieu sec et en présence d'une saturation en eau. Dans un second temps, les expériences sont réalisées sur les mêmes milieux en présence de polymère. Les expériences présentées ont été faites sur des massifs non consolidés de carbure de silicium (SiC) de différentes granulométries. Les fluides injectés séquentiellement, ou co-injectés, sont le diazote sec et la saumure.

6.1 Description du projet expérimental

6.1.1 Caractéristiques et préparation des fluides

Caractéristiques et préparation des fluides

Les fluides utilisés dans cette étude sont identiques à ceux employés dans le chapitre précédent (section 5.1.1). Leurs caractéristiques et les méthodes suivies pour leur préparation y sont précisées.

Le comportement rhéologique de la solution de polymère est donné en figure (6.1). La solution de polymère est injectée dans le milieu poreux en régime newtonien, dont la valeur plateau est de 2,9 à une température de 30°C. La concentration exacte de la solution de polymère est de 800 *ppm*.

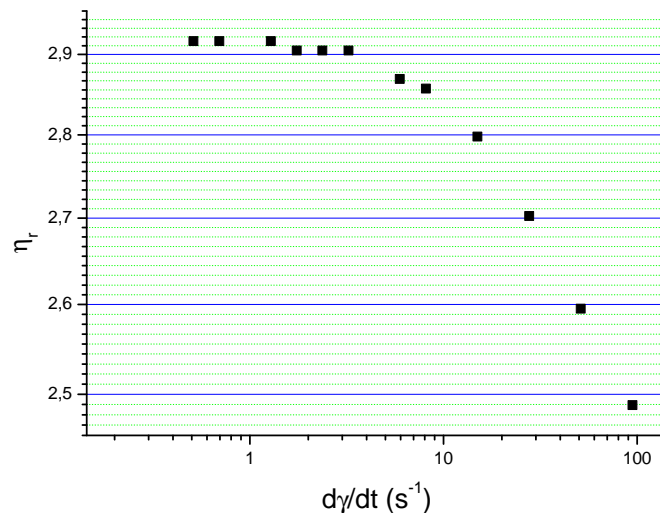


FIG. 6.1 – Viscosité de la solution de polyacrylamide. Mesures réalisées à $T = 30^\circ\text{C}$.

6.1.2 Caractéristiques des milieux poreux

L'ensemble des expériences a été effectué sur des massifs non consolidés obtenus à partir d'une poudre monodisperse de SiC présentant une granulométrie de 50 μm . Chaque échantillon a été réalisé par tassage manuel. La méthode employée précédemment (cf. section 5.1.2) n'a pu l'être dans le cadre de cette étude car la masse de la cellule en acier contenant le milieu rendait le tapis vibrant inefficace.

Le **milieu poreux** est alors confiné dans une nouvelle cellule en acier inoxydable cylindrique, dont la robustesse est plus importante, de longueur 12 *cm* et de diamètre

intérieur 1 *cm*. Ce dernier a été diminué afin d'obtenir plus facilement des nombres de Reynolds élevés. La zone d'étude se situe au centre de la cellule, elle mesure exactement 4 *cm*. Des embouts en acier inoxydable sont disposés à ses extrémités, lesquels possèdent un orifice qui permet l'injection ou la récupération des fluides. La perte de charge est mesurée à l'aide de prises de pression intermédiaires situées respectivement à 4 *cm* des extrémités sur le corps de la cellule. L'étanchéité est assurée par des joints toriques en nitrile. Entre le milieu poreux et les embouts, une grille en acier inoxydable est placée pour éviter l'écoulement des grains de SiC dans les circuits de fluide du dispositif. Une photographie de la cellule est donnée en figure (6.2)



FIG. 6.2 – Cellule utilisée pour étudier les effets inertiels.

6.1.3 Méthodes de mesure

La mesure de **porosité** est obtenue par bilan de masse solide. Contrairement à l'étude précédente (cf. section 5.1.3), l'acier inoxydable composant la cellule ne permet pas de mesurer la porosité et les champs de saturation locale par absorption γ . Il sera impossible dans ce cas-ci d'accéder à ces derniers lors de l'étude des écoulements diphasiques.

Les mesures de **perméabilité effective** au gaz aux saturations stationnaires en saumure ont toutes été réalisées sur le même principe en présence ou en absence de polymère adsorbé. Tout d'abord, un état de saturation est obtenu par co-injection du gaz à un débit volume Q_1 et de la saumure à Q_w jusqu'à la stabilisation de la perte de charge mesurée aux bornes du milieu poreux. Cette méthode de co-injection a été retenue pour la raison suivante : L'étude portant sur l'impact du polymère sur les effets inertiels, on est amené à utiliser des débits de gaz relativement élevés impliquant des volumes injectés importants. Des expériences préalables ont été réalisées en déplaçant simplement la saumure par le gaz et en effectuant les mesures de perméabilité en injectant le gaz seul. Celles-ci ont montré qu'un mécanisme de séchage très significatif se produisait et nous ont conduit à choisir la technique de

co-injection. Ensuite, des mesures de perte de charge sont effectuées aux bornes du massif pour différents débits de gaz imposés en entrée, lesquels restent toujours inférieurs à Q_1 , Q_w n'étant pas modifié. La même procédure est répétée pour chaque nouvelle valeur de Q_w . La perméabilité effective au gaz et le coefficient de Forchheimer à la saturation S_w sont déterminés en utilisant le modèle de Darcy-Forchheimer généralisé (cf. section 2.2.5).

Une remarque sur l'interprétation de la mesure de la perte de charge s'impose ici. En effet, comme les deux fluides, eau et gaz, s'écoulent et qu'aucun dispositif de discrimination des phases (parois semi-perméables ou autre) n'a été mis en place, la mesure de ΔP n'est pas celle, *stricto sensu*, dans le gaz compte tenu des effets capillaires. Toutefois, comme les débits utilisés sont élevés les effets inertiels et visqueux sont supposés dominants devant les effets capillaires qui sont négligés, de sorte que la perte de charge dans le gaz est égale à ΔP .

6.2 Procédure expérimentale

6.2.1 Dispositif expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la figure (6.3). En son centre, une cellule en acier inoxydable 316L résistant à une pression maximale de plus de 100 *bar* est installée verticalement. Deux thermocouples de type T sont disposés à ses bornes afin de mesurer les températures d'entrée et de sortie du milieu. *Il est à noter qu'aucune différence de température significative n'a été observée au cours des expériences présentées dans ce chapitre.* Deux prises de pression intermédiaires sont disponibles au centre du corps de la cellule et séparées de 4 *cm*. Un capteur de pression différentiel **Rosemount 3051** ® (0-10 *bar*) est relié aux prises de pression intermédiaires. Un capteur de pression absolue **Keller** (0-25 *bar*) est relié à celle située la plus en amont de l'écoulement. L'injection de la saumure ou de la solution de polymère et du gaz s'effectue par la même face d'entrée à l'aide respectivement d'une pompe **Pharmacia P500** ® permettant une gamme de débits liquides de 1 à 499 $cm^3.h^{-1}$ et de deux régulateurs de débits **Brooks Instruments** ® permettant une gamme de débit de gaz de 0 à 100 $l_n.min^{-1}$.

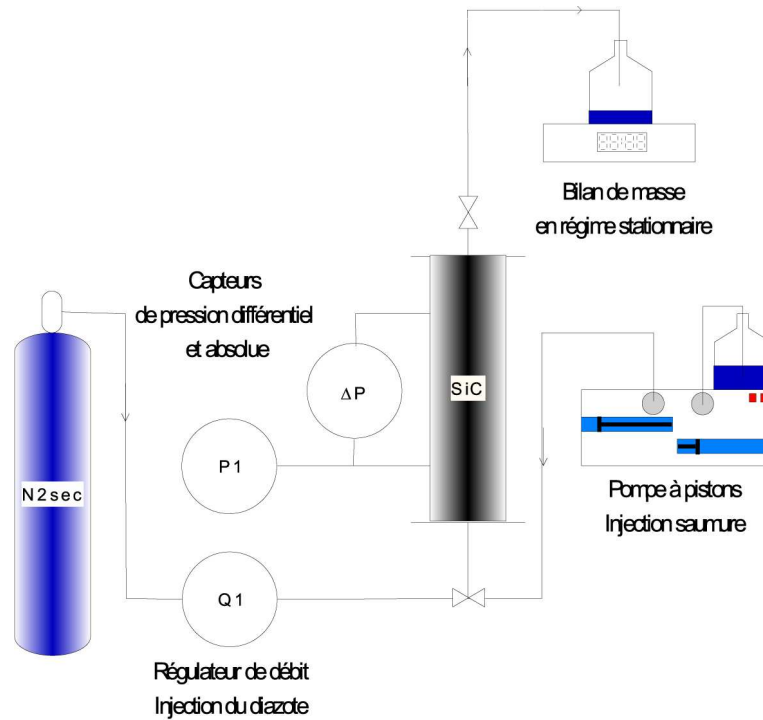


FIG. 6.3 – Dispositif expérimental pour l'étude des effets inertiels.

Les précisions des appareils de mesure sont fournies dans le tableau (6.1).

Type d'appareil	Précision sur la mesure
Balance (charge maximale 6,1 kg)	0,01 g
Régulateur de débit	$0,7\% * Q_{N_2} + 0,2\% * PE$
Capteur de pression différentiel	$0,04\% * \Delta P$
Capteur de pression absolue	$0,05\% * P_2$
Pompe Pharmacia	$1,5\% * Q_w$

TAB. 6.1 – Précisions des appareils de mesure. PE : Pleine Échelle.

6.2.2 Protocole expérimental

1. Injection de diazote, à pression atmosphérique.

Mesure de :

– la perméabilité au gaz

$k_g(atm)$

– du coefficient de Forchheimer

β

2. Injection de dioxyde de carbone.

3. **Saturation en saumure** du milieu.

Mesure de :

- la perméabilité à l'eau k_w
- la porosité ϕ

4. **Co-injection de diazote sec (débit Q_1) et de saumure (débit Q_w)**, jusqu'à l'obtention d'une stabilisation de la perte de charge.

Mesure de :

- la saturation stationnaire en saumure S_w
- la perte de charge aux prises de pression intermédiaires $\Delta P(Q_1, Q_w)$

5. **Répétition de l'étape 4 pour un nouveau débit $Q'_1 \neq Q_1$.**6. **Répétition des étapes 4 et 5** pour un nouveau débit de saumure Q'_w .7. Traitement des données à l'aide des **modèles de Darcy et Darcy-Forchheimer** pour chaque valeur de saturation.8. **Injection de dioxyde de carbone**, déplacement du diazote.9. **Saturation complète** du milieu en saumure.

Nouvelles mesures de :

- la perméabilité absolue à l'eau k'_w
- la porosité ϕ'

10. **Injection de polymère** - La réduction de mobilité est déterminée pour deux séries de débit d'injection du polymère, l'une à débits croissants et l'autre à débits décroissants.

Détermination de :

- la réduction de mobilité R_M

11. **Déplacement du polymère non adsorbé à la saumure** - Cette étape consiste à évacuer du massif le polymère non adsorbé. Ce déplacement s'effectue au même débit que celui de l'injection de polymère. La **réduction de perméabilité** est déterminée.

Mesure de :

- la perméabilité absolue à l'eau $k_w^{(p)}$
(après adsorption du polymère)

Détermination de :

- la réduction de perméabilité à l'eau

$$R_{kw}$$

12. **Co-injection de diazote sec (débit $Q_1^{(p)}$) et de saumure (débit $Q_w^{(p)}$)**, jusqu'à l'obtention d'une stabilisation de la perte de charge.

Mesure de :

- la saturation stationnaire en eau

$$S_w^{(p)}$$

- la perte de charge aux prises de pression intermédiaires en présence de polymère

$$\Delta P^{(p)}(Q_1, Q_w)$$

13. **Répétition de l'étape 11 pour chaque nouveau débit $Q_{1\max}^{(p)'} \neq Q_{1\max}^{(p)}$.**
14. **Répétition des étapes 12 et 13** pour un nouveau débit de saumure $Q_w^{(p)'}$.
15. Traitement des données à l'aide des **modèles de Darcy et Darcy-Forchheimer** pour chaque valeur de saturation.

Les **drainages** au gaz ont lieu dans une gamme de débit : $6-100 \text{ l}_n.\text{min}^{-1}$, permettant d'accéder au régime non-darcéen. Pour s'assurer de la tenue à la pression du dispositif expérimental, le débit maximal d'injection de diazote n'a pas excédé $50 \text{ l}_n.\text{min}^{-1}$, soit un nombre de Reynolds d'environ 28.

Comme indiqué dans le chapitre précédent, il est possible de calculer le taux de cisaillement à la paroi, lors d'un écoulement capillaire par l'expression ci-dessous :

$$\dot{\gamma} = \frac{4v}{\alpha_s} \sqrt{\frac{\phi}{8k}}$$

où v est la vitesse moyenne d'écoulement, ϕ la porosité, k la perméabilité absolue du milieu poreux et α_s un coefficient de correction géométrique du milieu.

Le polymère est injecté à un taux de cisaillement suffisamment faible pour que les mesures s'effectuent en régime newtonien.

6.3 Résultats

6.3.1 Massifs secs

Dans un premier temps, l'étude a eu pour objectif de mettre en évidence les effets inertiels dans les milieux poreux non consolidés secs constitués de SiC $50 \mu\text{m}$ (étape 1 du protocole expérimental). Dans un second temps, nous avons travaillé

avec des conditions de saturation en eau stationnaire, puis en présence de polymère adsorbé. Les données expérimentales de débit et de perte de charge ont été traitées à l'aide des modèles de Darcy et Darcy-Forchheimer pour déterminer respectivement la perméabilité au gaz du milieu $k_g(atm)$ et le coefficient de résistance inertielle β . L'ensemble des expériences a été réalisé sur une gamme de nombres de Reynolds variant entre 0,02 et 28.

Les diagrammes de Darcy pour deux massifs, indicés 1 et 2, de SiC $50 \mu m$ et de porosité 0,42 et 0,44 sont présentés sur la figure (6.4). Une déviation au régime darcéen est observée lorsque Re devient supérieur à 4, déviation qui s'explique par l'apparition des effets inertiels. En régime de Darcy, les valeurs des perméabilités au gaz des massifs 1 et 2 valent respectivement : $k_g^{(1)}(atm) = 1,4 \cdot 10^{-12} m^2$ et $k_g^{(2)}(atm) = 1,7 \cdot 10^{-12} m^2$; pour de tels massifs, il a été montré dans le chapitre précédent que l'effet Klinkenberg était négligeable.

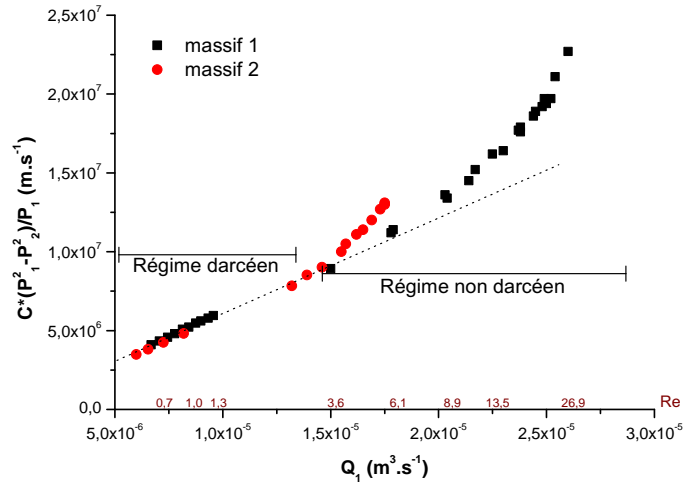


FIG. 6.4 – Diagrammes de Darcy et de l'évolution de Re pour deux massifs secs de SiC de $50 \mu m$, où $C = S/2\mu L$.

Les données expérimentales sont, par la suite, traitées à l'aide du modèle de Darcy-Forchheimer en figure (6.5) où les expressions de X et Y sont rappelées ci-dessous :

$$Y = \frac{P_1^2 - P_2^2}{2\mu P_1 L \left(\frac{Q_1}{S}\right)}$$

$$X = \frac{P_1 M Q_1}{R T S \mu}$$

Le diagramme de Darcy-Forchheimer présenté figure (6.5) peut se diviser en deux zones : l'une en forme de palier et l'autre linéaire croissante, lesquelles correspondent

respectivement aux écoulements en régime darcéen et non-darcéen. Dans la zone non darcéenne, la perte de charge donne le coefficient inertiel du milieu dont les valeurs pour les massifs 1 et 2 sont respectivement $\beta^{(1)} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$ et $\beta^{(2)} = 4,6 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$.

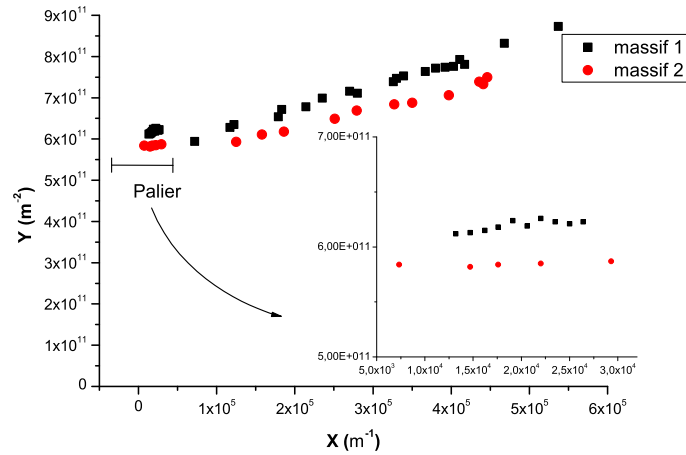


FIG. 6.5 – Diagrammes de Darcy-Forchheimer pour deux massifs de SiC de 50 μm . Écoulement de gaz en milieu sec

Comme démontré dans le chapitre 2, il est possible d'écrire l'équation de Darcy-Forchheimer sous la forme adimensionnelle rappelée ci-dessous :

$$\lambda_p Re = a(1 + bRe)$$

où λ_p , a^{-1} et bRe sont respectivement le coefficient de perte de charge, le nombre de Darcy et le nombre de Forchheimer.

La représentation sous forme adimensionnelle est utilisée pour traiter les résultats expérimentaux afin de comparer les valeurs de b avec celles de la littérature.

Sur la figure (6.6) nous avons représenté les résultats sous forme adimensionnelle en reportant $\lambda_p Re$ en fonction de Re pour les massifs 1 et 2. Dans cette représentation, le paramètre adimensionnel b a pu être déterminé par régression linéaire et vaut respectivement 0,020 et 0,016 soit 1/50 et 1/60, valeurs proches ou égales de celle attendue pour un sable anguleux laquelle a déjà été indiquée comme valant 1/50 (Chauveteau et Thirriot, 1967).

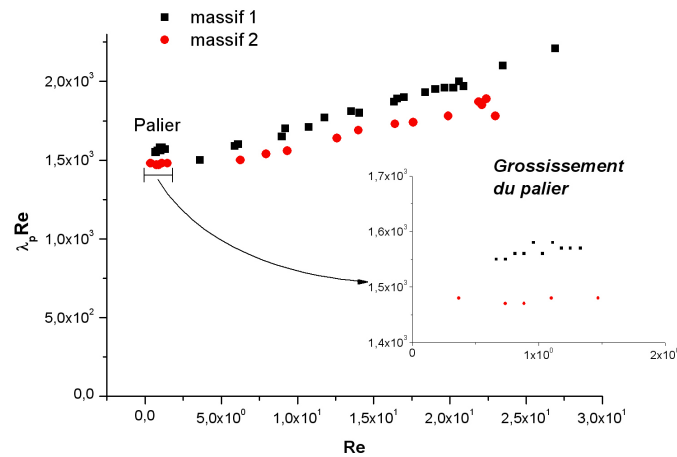


FIG. 6.6 – Représentation adimensionnelle $\lambda_p Re$ en fonction de Re pour les massifs 1 et 2 de SiC $50 \mu m$. Écoulement de gaz en milieu sec.

6.3.2 Massif partiellement saturé

Pour l'étude des écoulements diphasiques, un nouveau milieu (noté massif 3) a été réalisé dans les mêmes conditions que les massifs 1 et 2 à partir d'une poudre de SiC de granulométrie $50 \mu m$. A titre de vérification, nous ne présentons que les résultats à sec sous forme adimensionnelle (FIG. 6.7). Les caractéristiques pétrophysiques du massif lors de l'injection de diazote en milieu sec sont $k_g(atm) = 1,41 \cdot 10^{-12} m^2$ et $\phi = 0,41$. Une nouvelle fois, les deux régimes, darcéen (palier horizontal) et non darcéen (zone linéaire croissante), sont mis en évidence. On retrouve une valeur du paramètre adimensionnel b de $1/50$.

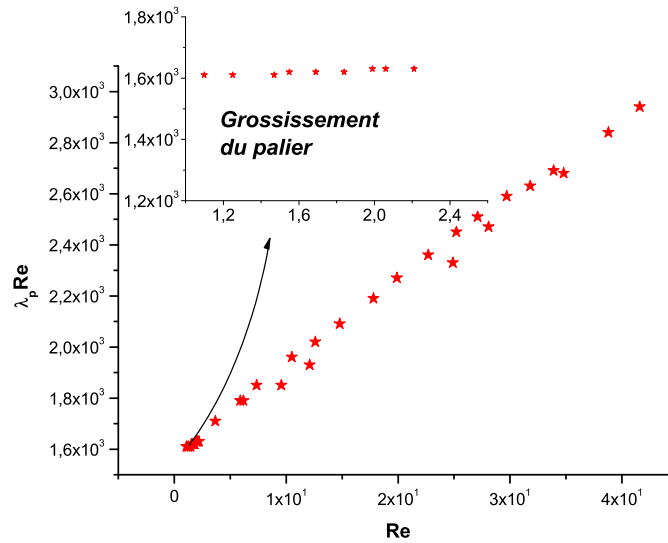


FIG. 6.7 – Représentation adimensionnelle $\lambda_p Re$ en fonction de Re . Massif 3. Écoulement de gaz en milieu sec.

Comme indiqué plus haut lors des expériences en milieu humide, les états de saturation stationnaire en eau ont été obtenus à l'aide d'une méthode de co-injection, afin d'éviter l'assèchement du milieu lors des écoulements de gaz. Pour un débit de saumure fixé Q_w , les mesures de perte de charge aux bornes du massif ont été réalisées pour différents débits de gaz Q_1 pouvant aller jusqu'à $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'opération a été reproduite pour plusieurs débits de saumure variant entre 5 et $150 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Pour chaque mesure, l'état de saturation stationnaire en eau a été déterminé par bilan de masse avec une précision absolue de 0,03. Les diagrammes de Darcy-Forchheimer ont été reconstitués en regroupant les mesures correspondant au même état de saturation.

Les résultats traités à l'aide du modèle de Darcy pour les états de saturation S_w valant 0,23, 0,29 et 0,35 sont reportés figure (6.8). Les conditions expérimentales difficiles (co-injection, régime diphasique, stabilisation des états de saturation, etc.) dans lesquelles ont été obtenus ces résultats n'ont pas permis d'obtenir beaucoup de points expérimentaux. La présence d'une saturation en eau a pour conséquence d'une part d'augmenter la perte de charge (effet de perméabilité effective) et d'autre part d'amplifier les effets inertiels (déviation du régime linéaire plus précoce pour les fortes saturations).

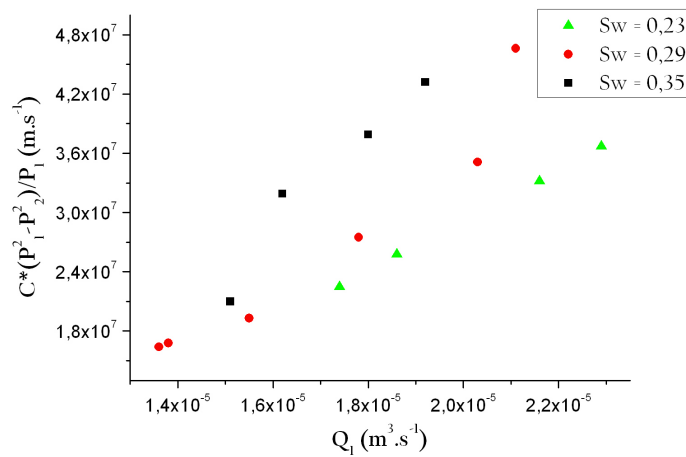


FIG. 6.8 – Diagramme de Darcy pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé, où $C = S/2\mu L$

La figure (6.9) présente les mêmes résultats que précédemment traités à l'aide du modèle de Darcy-Forchheimer. La régression linéaire dans ce type de diagramme permet d'identifier la perméabilité effective au gaz $k_g(S_w)$ et le coefficient inertiel β . Il est important de rappeler que la valeur de $k_g(S_w)$ ainsi déduite se trouve surestimée par rapport à celle obtenue à l'aide du modèle de Darcy Incompressible en régime darcéen.

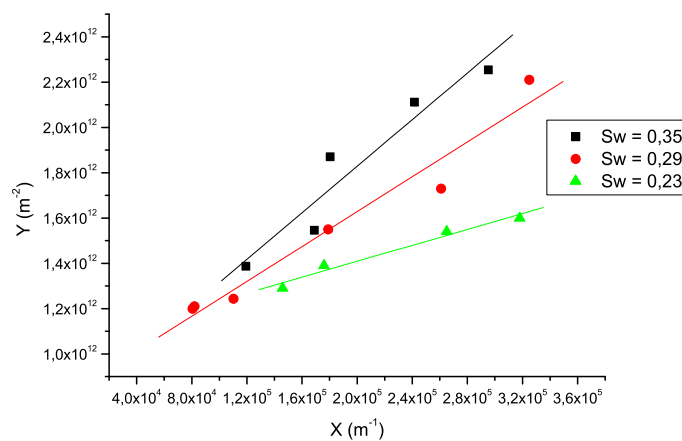


FIG. 6.9 – Diagramme de Darcy-Forchheimer pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé.

Les valeurs des coefficients de corrélation R' des régressions linéaires de la figure (6.9) sont résumées dans le tableau ci-dessous :

S_w	R'
0,35	0,95
0,29	0,98
0,23	0,99

TAB. 6.2 – Coefficients de corrélation des régressions linéaire des diagrammes de Darcy-Forchheimer de la figure (6.9).

Le tableau (6.3) donne les principales grandeurs mesurées. La présence d'eau dans le milieu poreux, comme attendu, conduit à une diminution de la perméabilité effective au gaz, $k_g(S_w)$, et de la porosité effective, ϕ_{eff} du milieu. Cet effet s'accompagne d'une augmentation significative du coefficient de résistance inertielle, β . Ce résultat est en accord avec de nombreuses références de la littérature (Geertsma, 1974; Evans *et al.*, 1987; Tiss et Evans, 1989; Coles et Hartman, 1998; Elmkies, 2001; Barree et Conway, 2004) qui montrent que les effets inertiels sont d'autant plus intenses que la perméabilité du milieu est faible. La présence d'eau à fortes saturations peut être assimilable à une présence solide diminuant les seuils de pores.

$S_w(Q_1)$	$k_g(S_w) (m^2)$	$\beta (m^{-1})$	ϕ_{eff}
0	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^5$	0,41
0,23	$9,5 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^6$	0,32
0,29	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$3,9 \cdot 10^6$	0,29
0,35	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^6$	0,27

TAB. 6.3 – Ensemble des résultats sur $k_g(S_w)$, β et ϕ_{eff} obtenus pour différentes valeurs de saturation en eau. Massif de SiC 50 μm .

Dans le tableau ci-dessus, la perméabilité effective au gaz, estimée à partir du régime de Darcy-Forchheimer, ne décroît pas systématiquement, comme attendu, avec l'augmentation de la saturation stationnaire en eau. Comme indiqué plus haut, les valeurs de la perméabilité effective au gaz reportées dans le tableau (6.3) sont surestimées par rapport à celles obtenues par le modèle de Darcy Compressible en régime darcéen. Cette surestimation n'est pas constante d'un état de saturation à un autre, par exemple elle vaut 4% et 20% pour les états de saturation stationnaire en eau respectivement égale à 0 et 0,29.

Calculs d'erreur sur $k_g(S_w)$ et β

Pour estimer la précision sur les valeurs de la perméabilité effective au gaz, $k_g(S_w)$, et du coefficient de résistance inertielle, β , déduites par des régressions linéaires nous avons procédé en suivant une méthode similaire à celle employée au chapitre 5. Nous avons estimé les erreurs sur les déterminations de $k_g(S_w)$ et β à partir des précisions de mesure attendues sur Q_1 , ΔP et P_1 . Pour ce faire, nous avons généré des séries de valeur de Q_1 , ΔP et P_1 tirées aléatoirement dans l'intervalle d'incertitude autour

des valeurs mesurées de ces trois quantités. De chacune de ces séries de valeurs nous avons estimé $k_g(S_w)$ et β , permettant d'évaluer ainsi l'écart type sur ces deux grandeurs. Cinquante séries de valeur Q_1 , ΔP et P_1 ont été utilisées pour cette procédure.

Le tableau (6.4) récapitule les différentes valeurs ainsi calculées. Il ressort de cette analyse que les valeurs extrapolées de perméabilité effective au gaz, $k_g(S_w)$ et du coefficient de Forchheimer, β , sont données avec des précisions qui varient entre 3% et 8%.

S_w	$\Delta k_g(S_w)$ (%)	$\Delta\beta$ (%)
0,23	3,5	7,6
0,29	4,2	4,2
0,35	6,6	6,1

TAB. 6.4 – Précisions sur les valeurs de $k_g(S_w)$ et β .

Avant de poursuivre l'étude du comportement des milieux lors de l'écoulement inertiel en présence de polymère, nous examinons maintenant la dépendance de nos résultats obtenus sur β vis-à-vis des autres paramètres pétrophysiques. Pour ce faire, nous nous appuyons sur une corrélation empirique proposée initialement par Geertsma (1974) pour des écoulements monophasiques et étendue à des écoulements gaz/eau par Evans *et al.* (1987). Cette relation relie le coefficient de résistance inertiel, β , au paramètre $\phi_{eff}^{-5,5} k_g^{-0,5}(S_w)$. Cette représentation en figure (6.10) montre qu'une corrélation linéaire se dégage avec un coefficient de corrélation proche de l'unité ($R'=0,97$).

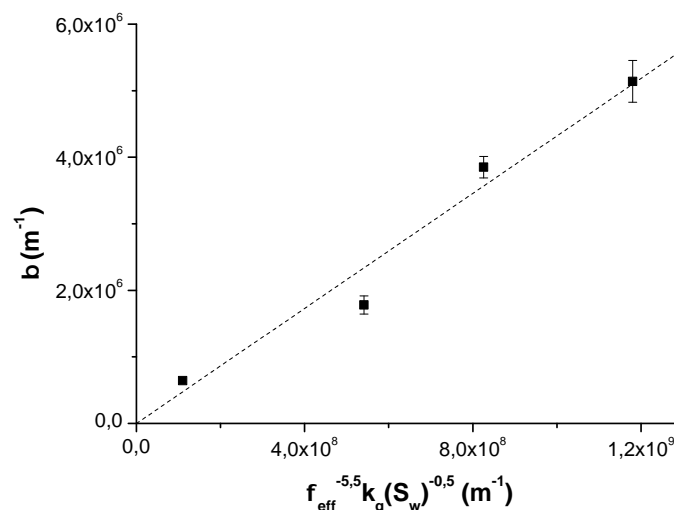


FIG. 6.10 – Évolution du coefficient de résistance inertielle β en fonction de $\phi_{eff}^{-5,5} k_g^{-0,5}(S_w)$.

Le coefficient de résistance inertielle est bien corrélé aux propriétés pétrophysiques par une relation similaire à celle de Geertsma donnée par :

$$\beta = \frac{\alpha}{\phi_{eff}^{5,5} k_g^{0,5} (S_w)} \quad (6.1)$$

où α est une constante caractéristique du milieu.

Nous examinerons dans les paragraphes qui suivent comment ce dernier résultat se compare à ceux obtenus après adsorption de polymère.

6.3.3 Massif partiellement saturé en présence de polymère

Cette étape du protocole expérimental a pour objectif d'examiner l'influence du polymère adsorbé sur le coefficient de résistance inertielle.

Adsorption du polymère

La méthode employée pour estimer le taux d'adsorption du polymère, Γ , a déjà été décrite en section 5.3.3. Dans le cas présent, Γ vaut $90 \mu g.g^{-1}$. Cette valeur correspond à ce qui est attendu compte tenu de la nature du polymère et du milieu poreux (Broseta *et al.*, 1995; Broseta et Medjahed, 1994; Chauveteau *et al.*, 2001).

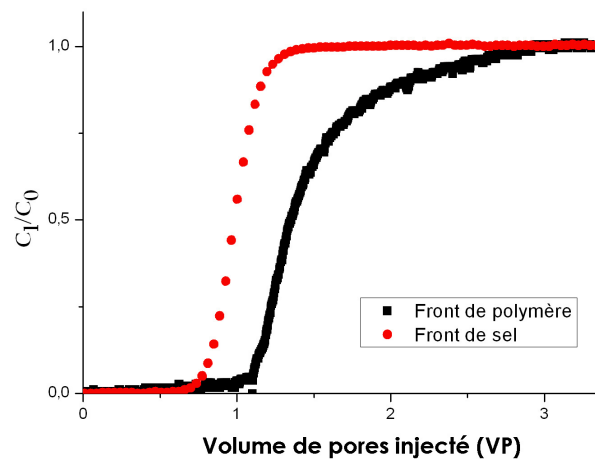


FIG. 6.11 – Mesure de l'adsorption du polymère par retard du front de polymère par rapport au front de sel utilisé comme traceur. Expérience réalisée sur un massif de SiC $50 \mu m$.

Les coefficients de réduction de mobilité et de perméabilité (respectivement R_M et R_{kw}) ont été déterminés pour différentes valeurs de taux de cisaillement. Leurs valeurs respectives au plateau newtonien sont 4 et 1,2 (cf. Fig. 6.12).

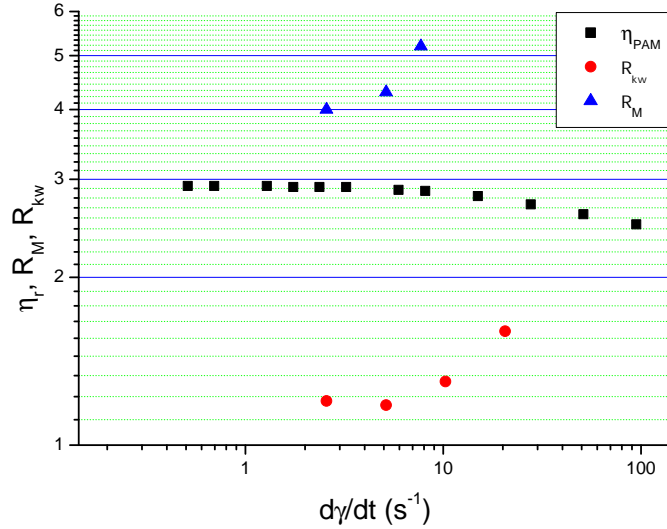


FIG. 6.12 – Mesure des réductions de mobilité et de perméabilité et de la viscosité de la solution de polymère à 30°C. Massif de SiC 50 μm .

L'épaisseur hydrodynamique de la couche de polymère adsorbé peut être déduite de la mesure du coefficient de réduction de perméabilité à la saumure, R_{kw} . En supposant que le rayon de pore effectif ou hydrodynamique, R_p , est réduit par une couche de polymère impénétrable d'épaisseur ε_h , on a :

$$\varepsilon_h = R_p(1 - R_{kw}^{-0,25}) \quad (6.2)$$

Dans le cas présent, la valeur de ε_h est égale à 0,26 μm , laquelle est relativement comparable à la valeur du rayon de giration du polyacrylamide neutre soit 0,16 μm (Broseta et Medjahed, 1994; Tabary, 2004).

Détermination du coefficient de résistance inertielle à différentes valeurs de saturation

De la même manière que pour le cas des écoulements diphasiques gaz/eau en l'absence de polymère, le coefficient de résistance inertielle $\beta^{(p)}$ et la perméabilité effective au gaz $k_g^{(p)}(S_w)$ extrapolée à partir du modèle de Darcy-Forchheimer ont été déterminés pour différentes valeurs de saturation stationnaire en eau $S_w^{(p)}$ obtenues par co-injection.

Les résultats traités à l'aide du modèle de Darcy pour les états de saturation S_w variant 0,17, 0,27 et 0,32 sont reportés figure (6.13). La présence de polymère a facilité l'obtention d'états de saturation stables, ce qui se traduit par une augmentation du

nombre de points expérimentaux. La présence d'une saturation en eau a pour conséquence d'une part d'augmenter la perte de charge (effet de perméabilité relative) et d'autre part d'amplifier les effets inertiels (déviation du régime linéaire plus précoce pour les fortes saturations).

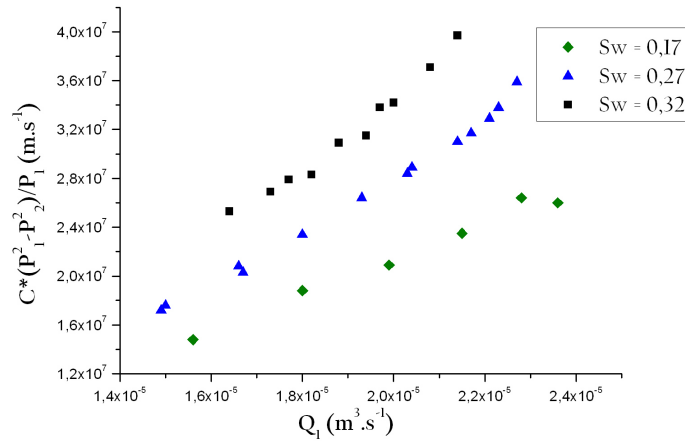


FIG. 6.13 – Diagramme de Darcy pour des injections de diazote dans un massif de SiC $50 \mu\text{m}$ partiellement saturé en présence de polymère adsorbé. Où $C = S/2\mu L$.

La figure (6.14) présente les données expérimentales précédentes traitées à l'aide du modèle de Darcy-Forchheimer. Les valeurs du coefficient de résistance inertielle $\beta^{(p)}$ et de la perméabilité effective à l'eau $k_g^{(p)}(S_w)$ extrapolées ont été obtenues par régression linéaire, le tableau (6.6) regroupe toutes ces données.

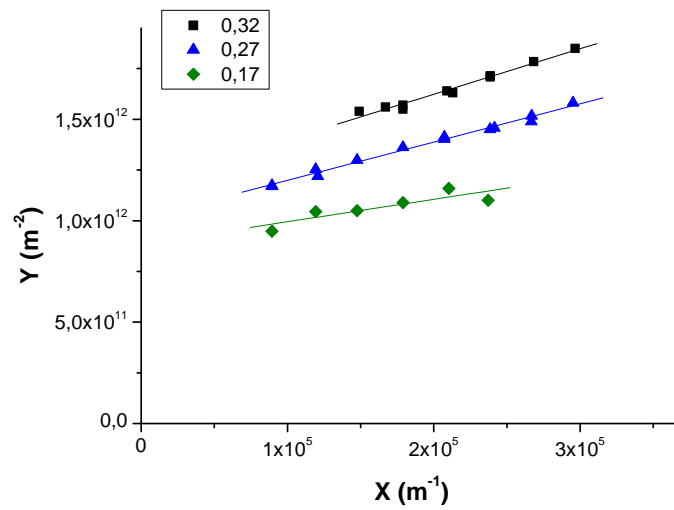


FIG. 6.14 – Diagramme de Darcy-Forchheimer pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé en présence de polymère.

Les valeurs des coefficients de corrélation des régressions linéaires précédentes sont résumées dans le tableau ci-dessous :

S_w	R'
0,32	0,94
0,27	0,97
0,17	0,87

TAB. 6.5 – Coefficients de corrélation des régressions linéaires des diagrammes de Darcy-Forchheimer présentés figure (6.14).

Comme attendu, l'augmentation de la saturation en saumure conduit à une augmentation du coefficient $\beta^{(p)}$, alors que la perméabilité effective au gaz $k_g^{(p)}(S_w)$ est diminuée. En effet, la présence d'eau a pour conséquence de diminuer la section efficace de passage du gaz.

S_w	$k_g^{(p)}(S_w) (m^2)$	$\beta^{(p)} (m^{-1})$	$\phi_{eff}^{(p)}$
0	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^5$	0,41
0,17	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^6$	0,34
0,27	$9,9 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^6$	0,30
0,32	$8,5 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^6$	0,29

TAB. 6.6 – Ensemble des résultats obtenus sur $k_g^{(p)}$, $\beta^{(p)}$ et $\phi_{eff} = \phi(1 - S_w)$ pour différentes valeurs de saturation en saumure. Massif de SiC 50 μm en présence de polymère adsorbé.

Calculs d'erreur sur $k_g^{(p)}(S_w)$ et $\beta^{(p)}$

De manière analogue au paragraphe 6.3.2, les précisions sur la perméabilité effective au gaz, $k_g^{(p)}(S_w)$, et le coefficient de résistance inertiel, $\beta^{(p)}$ ont été déterminées.

Le tableau (6.7) récapitule les différentes valeurs des erreurs sur $k_g^{(p)}(S_w)$ et $\beta^{(p)}$ ainsi estimées. Les valeurs extrapolées de perméabilité effective au gaz, $k_g^{(p)}(S_w)$, sont données avec une précision variant de 3,5% à 6,5% alors que celles du coefficient de Forchheimer, $\beta^{(p)}$, varient entre 9,5% et 15,4%.

$S_w^{(p)}$	$\Delta k_g^{(p)}(S_w) (\%)$	$\Delta \beta^{(p)} (\%)$
0,17	3,5	15,4
0,27	6,11	14,0
0,32	6,4	9,5

TAB. 6.7 – Précisions sur les valeurs de $k_g^{(p)}(S_w)$ et $\beta^{(p)}$.

La représentation de l'évolution du coefficient de résistance inertiel $\beta^{(p)}$ en fonction du paramètre $\phi_{eff}^{-5,5(p)} k_g^{-0,5}(S_w)^{(p)}$ sur la figure (6.15) montre à nouveau une tendance linéaire croissante similaire à celle observée dans le cas d'écoulements diphasiques en l'absence de polymère avec un coefficient de corrélation proche de l'unité ($R^2=0,96$).

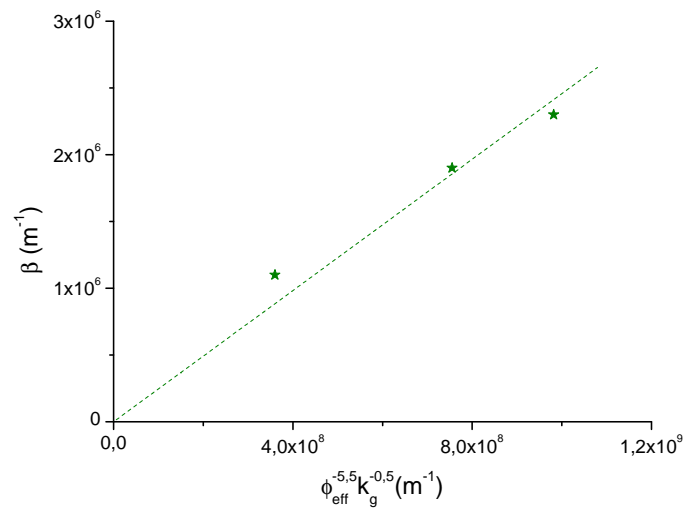


FIG. 6.15 – Évolution du coefficient de résistance inertielle $\beta^{(p)}$ en fonction de $\phi_{\text{eff}}^{(p)-5.5} k_{N2}^{-0.5}(S_w)^{(p)}$.

Comparaison des résultats

Les résultats présentés dans les tableaux (6.3) et (6.6) montrent deux tendances sur l'influence du polymère : l'une tend à confirmer les observations antérieures (Elmkies, 2001; Elmkies *et al.*, 2002) : A saturation équivalente avant et après adsorption de polymère, le coefficient de résistance inertielle (ou de Forchheimer) diminue (par exemple à $S_w = 0,29$; $\beta^{(p)}$ diminue de plus de 20% par rapport à la valeur de β en l'absence de polymère). L'autre tendance indique que la perméabilité effective au gaz $k_g(S_w)$ extrapolée du modèle de Darcy-Forchheimer est faiblement affectée (environ 10%).

Le traitement des données expérimentales par le modèle de Darcy (FIG. (6.16)) montre qu'en présence de polymère la perte de charge est diminuée à débit équivalent et que le régime inertiel semble être repoussé à de plus forts débits ou nombres de Reynolds.

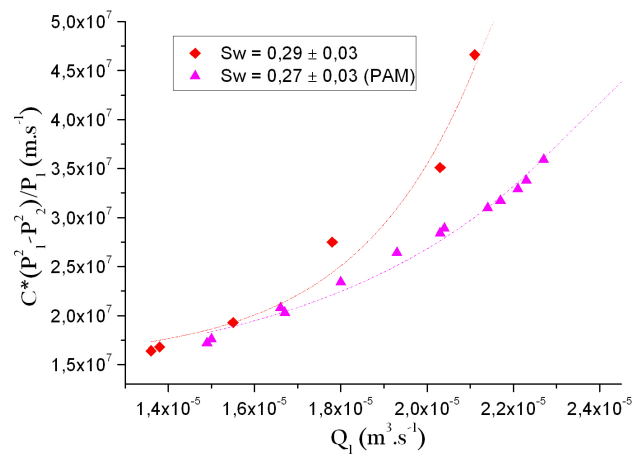


FIG. 6.16 – Diagramme de Darcy pour deux états de saturation équivalents en l'absence et en présence de polymère adsorbé, où $C = S/2\mu L$. Massif de SiC $50 \mu\text{m}$.

La figure (6.17) compare les représentations de Geertsma, β en fonction de $\phi_{eff}^{-5,5} k_g^{-0,5}(S_w)$ en l'absence et en présence de polymère. Après adsorption de polymère, la pente est significativement diminuée. Cela indique une atténuation notable de l'intensité des effets inertiels toute chose étant égale par ailleurs (en particulier la saturation). L'interprétation physique de ce mécanisme réside dans la modification de la topologie de l'espace poral en terme de tortuosité et de rugosité.

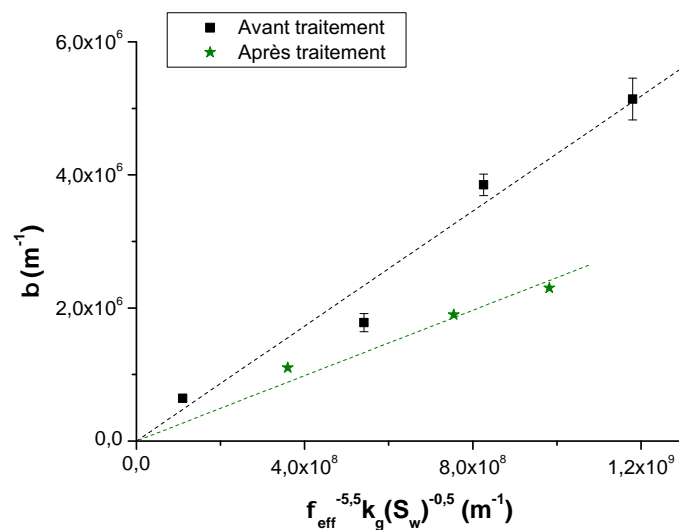


FIG. 6.17 – Représentation de Geertsma en l'absence et en présence de polymère. Massif de SiC $50 \mu\text{m}$.

6.4 Conclusions

Dans ce chapitre, des écoulements diphasiques gaz/eau à travers un milieu poreux non consolidé en absence puis en présence d'une couche de polymère adsorbé ont été étudiés en régime inertiel. L'objectif de cette étude était de réaliser en laboratoire des conditions d'écoulement se rapprochant de celles aux abords des puits à gaz, tout en maîtrisant, autant que possible, les propriétés du milieu, afin d'observer l'action du polymère sur les effets inertiels. Pour cela, un protocole expérimental relativement complexe et délicat a été mis au point permettant de mesurer les perméabilités effectives au gaz et le **coefficient de résistance inertielle** (ou de Forchheimer) lors de **co-injections** de gaz et d'eau.

Les expériences ont été réalisées sur un milieu poreux non consolidé de SiC $50 \mu m$. Pour commencer, une étude à sec a permis de mettre en évidence les effets inertiels. Le paramètre adimensionnel b a été trouvé égal à $1/50$, valeur correspondant à des sables à grains anguleux qui décrivent assez bien la poudre de SiC.

Ensuite, une étude sur l'influence de la présence d'eau sur les effets inertiels a été réalisée. Elle a permis de faire ressortir une **augmentation du coefficient de Forchheimer en présence d'une saturation stationnaire en eau**. Un tel comportement peut être expliqué en terme de perméabilité. En effet, la section efficace de passage du gaz se voit d'autant plus diminuée que la saturation en saumure est importante, d'où une augmentation des effets inertiels. Par ailleurs, une corrélation entre le coefficient de résistance inertiel et le paramètre $\phi_{eff}^{-5,5} k_g^{-0,5} (S_w)$ a été observée, ce qui confirme des observations antérieures (Geertsma, 1974; Evans *et al.*, 1987; Elmkies *et al.*, 2001).

Pour terminer, en présence d'une couche de polymère adsorbé une **réduction sélective de perméabilité** a pu être mise en évidence. Par ailleurs, pour une saturation équivalente en eau, **le coefficient de résistance inertielle a été réduit par la présence de polymère**. Une telle observation peut s'expliquer par la modification de l'espace poral en terme de rugosité et tortuosité due à la présence de polymère adsorbé.

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

L'ensemble de ce travail avait pour objectif d'étudier les modifications des effets non-linéaires directement liés à la présence d'une couche de polymère adsorbé sur des écoulements diphasiques gaz/eau en régimes raréfié et inertiel. Pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques se produisant lors de ces écoulements, des massifs modèles non consolidés de Carbure de Silicium de différentes granulométries ont été retenus. Une solution aqueuse de polyacrylamide neutre de concentration 1 g.l^{-1} (ou 1000 ppm) a été choisie afin d'obtenir un taux d'adsorption élevé. Les fluides injectés séquentiellement ou co-injectés simultanément étaient le diazote sec et la saumure.

Pour commencer, une description générale des lois régissant les écoulements en milieu poreux à différentes échelles a été fournie. Ensuite, les effets non-linéaires (Klinkenberg et inertiels) ont été décrits en détail. Les propriétés des solutions de polymère et leurs comportements rhéologiques ont été abordés en prélude à une description plus précise de leur rhéologie en milieu poreux et de leurs effets sur des écoulements d'huile, puis de gaz après adsorption de polymère.

En régime raréfié, il a été mis en évidence sur des milieux poreux secs que l'effet Klinkenberg était directement lié à la perméabilité intrinsèque du massif.

En régime diphasique, les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence deux régimes d'évolution de l'effet Klinkenberg avec la saturation en eau. A faibles saturations, l'effet Klinkenberg reste constant alors qu'à fortes saturations il est augmenté. Une répartition pendulaire ou continue de la phase mouillante est certainement à l'origine de ce phénomène.

En outre, il s'avère que la présence de polymère a pour conséquence de réduire fortement l'effet Klinkenberg. Trois conjectures ont été proposées pour interpréter ce résultat :

- la solution de polymère a obstrué les pores de petites taille, ce qui se traduit par une diminution de l'effet Klinkenberg; explication certainement insuffisante compte tenu des propriétés du SiC;

- deux phénomènes entrent en opposition dont le second aurait prédominance : la diminution de la section efficace de pore par le polymère adsorbé (augmentation) et l'absorption de l'énergie des chocs paroi/particule par les macromolécules (diminution) ;
- la topologie de la surface porale a été complètement modifiée par la présence du polymère, modifiant ainsi la dépendance attendue de l'effet Klinkenberg vis-à-vis de la perméabilité.

En régime inertiel, il a été mis en évidence une déviation du régime de Darcy sur des milieux de SiC $50\ \mu\text{m}$ sec. Les résultats ont été traités à l'aide des modèles de Darcy et Darcy-Forchheimer. La valeur du paramètre adimensionnel, b , a été trouvée égale à $1/50$ pour trois massifs différents. Ce résultat est attendu pour des sables anguleux dont la structure est proche de celle des grains de SiC.

En régime diphasique, la présence d'une saturation stationnaire en eau a pour conséquence d'augmenter fortement les effets inertiels. Un tel comportement peut s'expliquer en terme de perméabilité. En effet, la section efficace libre pour le passage du gaz est d'autant plus diminuée que la saturation en saumure est importante. Par ailleurs, la corrélation de Geertsma (1974) a été confirmée.

En outre, la présence d'une couche de polymère adsorbé atténue l'intensité des effets inertiels. A l'échelle du pore, une telle observation peut s'expliquer par la modification de l'espace poral en termes de rugosité et de tortuosité.

Ce travail a montré que la présence de polymère adsorbé diminue les effets non-linéaires. Outre ces observations, il a également été mis en évidence qu'une couche de polymère adsorbé réduit la perméabilité à l'eau, alors que celle au gaz est peu affectée. Ces différents résultats permettent d'être optimiste sur une éventuelle utilisation de cette technique sur des roche-réservoirs pour l'amélioration de la productivité des puits de stockage de gaz en aquifère.

De plus, l'étude de l'influence du vieillissement de la couche de polymère sur sa capacité de modification des écoulements gaz/eau permettrait de mieux appréhender l'impact du polymère sur le long terme. Enfin, un nouvel aspect de cette méthode pourrait être développé par l'étude de l'action du polymère sur la rétention de particules.

Table des figures

1.1	<i>Récupération secondaire.</i>	9
2.1	<i>Illustration des différentes échelles.</i>	13
2.2	<i>Illustration des grandes catégories de milieu poreux.</i>	14
2.3	<i>Type d'écoulement en fonction du nombre de Knudsen.</i>	17
2.4	<i>Représentation adimensionnelle des régimes d'écoulement en présence ou en absence d'effets inertiels.</i>	24
2.5	<i>Représentation de deux phases non-miscibles 1 et 2 dans un tube capillaire.</i>	27
2.6	<i>Exemple de mouillage d'un solide par un liquide.</i>	29
2.7	<i>Perméabilités relatives pour un écoulement diphasique gaz/eau (Ertekin et al., 1986).</i>	32
3.1	<i>Représentation d'une molécule de polyacrylamide.</i>	34
3.2	<i>Représentation semi-développée du polyacrylamide.</i>	35
3.3	<i>Représentation d'un copolymère.</i>	35
3.4	<i>Polymères branchés : (a) polymère en étoile - (b) polymère en peigne.</i>	36
3.5	<i>Rayon de giration.</i>	37
3.6	<i>Comportement rhéologique de solutions de Xanthane (Chauveteau et Zaitoun, 1981).</i>	40
3.7	<i>Cycles de stabilisation de polymère.</i>	44
3.8	<i>Mécanismes de rétention de polymère en milieu poreux : (1) adsorption, (2) piégeage mécanique, (3) piégeage hydrodynamique.</i>	45

3.9	<i>Illustration du phénomène de volume exclu à une solution de polymère dans un milieu non adsorbant (Broseta et al., 1995).</i>	46
4.1	<i>Représentation schématique de l'effet d'une couche de polymère adsorbé en écoulement monophasique. La couche réduit la zone d'étranglement causant une réduction de perméabilité.</i>	51
4.2	<i>Mécanisme expliquant la réduction sélective de perméabilité. Lorsque la phase huile s'écoule, la pression capillaire entraîne une contraction de la couche de polymère.</i>	51
4.3	<i>Représentation schématique de l'effet de paroi.</i>	53
4.4	<i>Modèle de la gouttelette : roche fortement mouillable à l'huile.</i>	54
5.1	<i>Comportement rhéologique de la solution de polyacrylamide de concentration 1140 ppm. Mesures réalisées à $T = 30^{\circ}\text{C}$.</i>	58
5.2	<i>Dispositif expérimental pour l'étude de l'effet Klinkenberg.</i>	62
5.3	<i>Mise en évidence de l'effet Klinkenberg. Massif de SiC 30 μm.</i>	67
5.4	<i>Évolution de $\mu\text{LPQ}_1/S\Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm.</i>	67
5.5	<i>Évolution de $\mu\text{LPQ}_1/S\Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm.</i>	68
5.6	<i>Champ de porosité locale du milieu poreux composé de SiC 30 μm; $\phi_{\gamma} = 0,43$; $L = 9,7\text{ cm}$ et $D = 3,9\text{ cm}$.</i>	71
5.7	<i>Champs de saturation locale en saumure pour les valeurs moyennes de $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,12$ et $0,34$.</i>	72
5.8	<i>Champs de saturation locale en saumure du massif de SiC 18 μm.</i> . . .	72
5.9	<i>Évolution de $\mu\text{LQ}_1/S\Delta P$ en fonction de la pression moyenne P_m. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,34$.</i>	73
5.10	<i>Évolution de $\mu\text{LQ}_1/S\Delta P$ en fonction de la pression moyenne P_m. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1\text{max}}) = 0,12$.</i>	73
5.11	<i>Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation en saumure. Massifs de SiC 30 μm.</i>	74
5.12	<i>Évolution de κ en fonction de $S_w(Q_{1\text{max}})$. Massifs de SiC 30 μm.</i> . . .	75
5.13	<i>Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation en saumure. Massif de SiC 18 μm.</i>	76

5.14	<i>Évolution de l'effet Klinkenberg en fonction de la saturation en saumure. Massif de SiC 18 μm.</i>	77
5.15	<i>Mesure de l'adsorption du polymère par retard du front de polymère par rapport au front de sel utilisé comme traceur. Massif de SiC 30 μm.</i>	78
5.16	<i>Comparaison entre le second front de polymère et le front de sel utilisé comme traceur. Massif de SiC 30 μm.</i>	78
5.17	<i>Mesure de la réduction de mobilité et de perméabilité à la saumure dans un massif de SiC 30 μm et du comportement rhéologique de la solution de polyacrylamide à 30°C.</i>	79
5.18	<i>Champs de saturation locale en saumure à différentes valeurs moyennes en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm. Etats de saturation relevés en début et en fin d'expérience.</i>	80
5.19	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm; $S_w = 0,18$.</i>	81
5.20	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne en présence de polymère adsorbé. Massif de SiC 30 μm; $S_w = 0,35$.</i>	81
5.21	<i>Influence du polymère sur la répartition de l'eau - Massifs de SiC 30 μm.</i>	83
5.22	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massifs de SiC 5 et 8 μm.</i>	86
5.23	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massifs de SiC 18 et 30 μm.</i>	86
5.24	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 50 μm.</i>	87
5.25	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1max}) = 0,12$ et $0,15$.</i>	88
5.26	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1max}) = 0,20$ et $0,24$.</i>	88
5.27	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1max}) = 0,31$ et $0,34$.</i>	89
5.28	<i>Champs de saturation locale. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1max}) = 0,20$ et $0,24$.</i>	90
5.29	<i>Champs de saturation locale. Massif de SiC 30 μm; $S_w(Q_{1max}) = 0,15$ et $0,31$.</i>	90

5.30	<i>Champs de saturation locale. Massif de SiC 30 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,12$ et $0,34$.</i>	91
5.31	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,18$ et $0,25$.</i>	92
5.32	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,32$ et $0,35$.</i>	92
5.33	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif de SiC 18 μm ; $S_w(Q_{1max}) = 0,46$.</i>	93
5.34	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif SiC 30 μm avec PAM ; $S_w(Q_{1max}) = 0,18$ et $0,30$.</i>	94
5.35	<i>Évolution de $\mu LP_1 Q_1 / S \Delta P$ en fonction de la pression moyenne. Massif SiC 30 μm avec PAM ; $S_w(Q_{1max}) = 0,35$.</i>	95
5.36	<i>Champs de saturation locale. Massif de SiC 18 μm</i>	95
6.1	<i>Viscosité de la solution de polyacrylamide. Mesures réalisées à $T = 30^\circ\text{C}$.</i>	97
6.2	<i>Cellule utilisée pour étudier les effets inertiels.</i>	98
6.3	<i>Dispositif expérimental pour l'étude des effets inertiels.</i>	100
6.4	<i>Diagrammes de Darcy et de l'évolution de Re pour deux massifs secs de SiC de 50 μm, où $C = S/2\mu L$.</i>	103
6.5	<i>Diagrammes de Darcy-Forchheimer pour deux massifs de SiC de 50 μm. Ecoulement de gaz en milieu sec</i>	104
6.6	<i>Représentation adimensionnelle $\lambda_p Re$ en fonction de Re pour les massifs 1 et 2 de SiC 50 μm. Ecoulement de gaz en milieu sec.</i>	105
6.7	<i>Représentation adimensionnelle $\lambda_p Re$ en fonction de Re. Massif 3. Ecoulement de gaz en milieu sec.</i>	106
6.8	<i>Diagramme de Darcy pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé, où $C = S/2\mu L$</i>	107
6.9	<i>Diagramme de Darcy-Forchheimer pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé.</i>	107
6.10	<i>Évolution du coefficient de résistance inertielle β en fonction de $\phi_{eff}^{-5,5} k_g^{-0,5} (S_w)$.</i>	109
6.11	<i>Mesure de l'adsorption du polymère par retard du front de polymère par rapport au front de sel utilisé comme traceur. Expérience réalisée sur un massif de SiC 50 μm.</i>	110

6.12	<i>Mesure des réductions de mobilité et de perméabilité et de la viscosité de la solution de polymère à 30°C. Massif de SiC 50 μm.</i>	111
6.13	<i>Diagramme de Darcy pour des injections de diazote dans un massif de SiC 50 μm partiellement saturé en présence de polymère adsorbé. Où $C = S/2\mu L$.</i>	112
6.14	<i>Diagramme de Darcy-Forchheimer pour un massif de SiC 50 μm partiellement saturé en présence de polymère.</i>	113
6.15	<i>Évolution du coefficient de résistance inertielle $\beta^{(p)}$ en fonction de $\phi_{eff}^{(p)-5,5} k_{N_2}^{-0,5} (S_w)^{(p)}$.</i>	115
6.16	<i>Diagramme de Darcy pour deux états de saturation équivalents en l'absence et en présence de polymère adsorbé, où $C = S/2\mu L$. Massif de SiC 50 μm.</i>	116
6.17	<i>Représentation de Geertsma en l'absence et en présence de polymère. Massif de SiC 50 μm.</i>	116

Nomenclature

a^{-1}	Nombre de Darcy	<i>SD</i>
bR_e	Nombre de Forchheimer	<i>SD</i>
C	Constante de Klinkenberg	<i>N</i>
C_i	Concentration du composé i	$kg.m^{-3}$
C_{0i}	Concentration initiale du composé i	$kg.m^{-3}$
$d_e^{(k)}$ et $d_e^{(C)}$	Diamètres de pore équivalent	m
dp	Diamètre moyen de pores	m
d_g	Diamètre de grain	m
D	Diamètre du milieu poreux	m
I	Indice de polydispersité d'un polymère	<i>SD</i>
K_n	Nombre de Knudsen	<i>SD</i>
m et n	Constantes caractéristiques d'un polymère	<i>SD</i>
P_c	Pression capillaire	<i>Pa</i>
r	Rayon capillaire	m
R'	Coefficient de corrélation des régressions linéaires	<i>SD</i>
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
R_e	Nombre de Reynolds	<i>SD</i>
R_{ki}	Réduction de perméabilité à la phase i	<i>SD</i>
R_m	Réduction de mobilité	<i>SD</i>
R_p	Rayon moyen de pore	m

g	Constante de gravitation	$m^3.kg^{-1}.s^{-2}$
k	Perméabilité absolue	m^2
k_i	Perméabilité de la phase i en l'absence de polymère	m^2
$k_i^{(p)}$	Perméabilité de la phase i en présence de polymère	m^2
$k_i(S_w, P_m)$	Perméabilité effective de la phase i à une saturation S_w et à la pression moyenne P_m en l'absence de polymère	m^2
$k_i^{(p)}(S_w, P_m)$	Perméabilité effective de la phase i à une saturation S_w et à la pression moyenne P_m en présence de polymère	m^2
k_{ri}	Perméabilité relative à la phase i	m^2
L	Longueur du milieu poreux	m
m_i	Masse de la phase i	kg
M	Masse moléculaire	$g.mol^{-1}$
\overline{M}_n	Masse moléculaire moyenne en nombre	$g.mol^{-1}$
\overline{M}_p	Masse moléculaire moyenne en poids	$g.mol^{-1}$
N_{mp}	Concentration molaire en chaînes polymériques	
N_i	Nombre de photons émergent	
P_{sd}	Pression sans dimension	SD
P_i	Pression absolue de la phase fluide i	Pa
P_m	Pression moyenne entre l'entrée et la sortie de colonne	Pa
Q_i	Débit volume de la phase i	$m^3.s^{-1}$
Q_{mi}	Débit masse de la phase i	$kg.s^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits	
Re	Nombre de Reynolds	SD
R_G	Rayon de giration d'une molécule de polymère	m
S	Surface	m^2
S_w	Saturation stationnaire en saumure	SD
$S_w(Q_{1max})$	Saturation irréductible en saumure au débit Q_{1max}	SD
T	Température	K
v_i	Vitesse de la phase fluide i	$m.s^{-1}$
v_{sd}	Vitesse sans dimension	SD
V_i	Volume de la phase fluide i	m^3
V_p	Volume de pores	m^3
V_{pi}	Volume de pores inaccessible à la solution de polymère	m^3

Symboles grecs

ΔP	Perte de charge	Pa
ΔH_m	Enthalpie de mélange	$J.kg^{-1}$
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	s^{-1}
γ	Tension interfaciale	$N.m^{-1}$
ζ	Rayon de courbure	m
κ	Pourcentage de Klinkenberg	$\%$
β	Coefficient de Forchheimer	m^{-1}
ε_i	Fraction volumique de la phase i	SD
ε_h	Épaisseur de la couche de polymère adsorbé	m
ς	Paramètre de Greetingsma	SD
$\sigma(i)$	Covariance de la grandeur i	SD
ξ	Coefficient d'adsorption de photon	$b.mol^{-1}$
χ_{12}	Paramètre d'interaction de Flory Huggins	SD
α	Paramètre caractéristique du milieu poreux	
α_G ou α_s	Coefficient de correction géométrique	SD
θ	Angle de mouillage	$^\circ$
λ	Libre parcours moyen des particules	m
λ_p	Coefficient de perte de charge	SD
μ_i	Viscosité dynamique d'un fluide i	$Pa.s$
μ_{ri}	Viscosité relative de la phase i	SD
μ_{app}	Viscosité apparente	$Pa.s$
ρ_i	Masse volumique de la phase i	$kg.m^3$
τ	Contrainte de cisaillement	N
ϕ	Porosité du milieu poreux	SD
ϕ_{poly}	Porosité effective à la solution de polymère	SD
ϕ_{eff}	Porosité effective	SD

Index

- Adsorption, 44, 47
- Carbure de Silicium, 14, 66
- Changement d'échelle, 18
- Cisaillement, 39
- Coefficient de résistance inertielle, 20
- Concentration molaire, 37
- Darcy Compressible, 21
- Darcy Généralisée, 30
- Darcy Incompressible, 19
- Darcy-Forchheimer, 22
- Diamètre de pore, 68
- Echelle, 12
- Écoulement, 39
- Effet de paroi, 43, 53
- Effets inertiels, 20, 96
- Flory-Huggins, 38
- Flux effusif, 17
- Flux visqueux, 17
- Forces capillaires, 26
- Forchheimer, 20
- Gammamétrie, 60
- Granulométrie, 14
- Initiation, 36
- Klinkenberg, 24, 57, 68, 84
- Knudsen, 16
- Libre parcours moyen, 16
- Masse moléculaire, 36
- Milieu poreux, 13
- Monomère, 34
- Mouillabilité, 28, 52
- Navier-Stokes, 15
- Nombre de Darcy, 23
- Nombre de Forchheimer, 23
- Perméabilité effective, 31
- Perméabilité relative, 31
- Piégeage mécanique, 45
- Poisueille (loi), 41
- Polydispersité, 37
- Polymérisation, 36
- Polymère, 34
- Polymère ramifiés, 35
- Pore, 12
- Porosimétrie, 14
- Porosité, 15, 60
- Pression capillaire, 28, 55
- Propagation, 36
- Récupération primaire, 8
- Récupération secondaire, 8
- Récupération tertiaire, 9
- Réduction de mobilité, 49
- Réduction Sélective de Perméabilité, 10, 49, 50, 83, 84
- Rétention, 44
- Rétention hydrodynamique, 45
- Rayon de giration, 37
- Reynolds, 16
- Rhéologie (polymère), 39, 41
- Saturation, 30, 60
- Saumure, 58
- Solvant, 38
- Stabilisation (Polymère), 43
- Stokes, 17
- Surface spécifique, 14
- Taux d'adsorption, 47
- Taux de cisaillement, 42
- Tensions interfaciales, 26
- Terminaison, 36
- Viscosité relative, 41

Volume de pores inaccessibles, 45

Bibliographie

- P. BARREAU : *Modifications Des Propriétés Polyphasiques D'un Milieu Poreux En Présence D'une Couche de Polymère Adsorbé : Études Expérimentale et Numérique*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 1996.
- P. BARREAU, D. LASSEUX, H. BERTIN et A. ZAITOUN : Effect of adsorbed polymers on relative permeability and capillary pressure : A pore scale numerical study. *Boundary Elements*, 17:549 – 576, 1995.
- R.D. BARREE et M.W. CONWAY : Beyond Beta Factors : A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer Flow in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*, page SPE 89325, 2004.
- J. BARRÈRE : *Modélisation des écoulements de Stokes et Navier-Stokes en milieu poreux*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1990.
- M. Van BEYLEN, A. GOURDENNE, F. SCHUÉ, R. SAGNES, M. FONTAILLE, J.P. VAIRON et P. DUMAS : *Initiation à la Chimie et à la Physico-Chimie Macromoléculaires*. Groupe Français des Polymères, 1997.
- D. BROSETA et F. MEDJAHED : Effects of Substrate Hydrophobicity on Polyacrylamide Adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 170:457–465, 1994.
- D. BROSETA, F. MEDJAHED, J. LECOURTIER et M. ROBIN : Polymer Adsorption/Retention in Porous Media : Effects of Core Wettability and Residual Oil. *SPE*, 24149, 1995.
- P.C. CARMAN : *L'écoulement des gaz à travers les milieux poreux*. *Presses Universitaires de France*, 1956.
- G. CHAUVETEAU : *Mobility control by polymer*, volume 33. Elsevier Applied Science Publishers, 1991.
- G. CHAUVETEAU, K. DENYS et A. ZAITOUN : New Insight on Polymer Adsorption Under High Flow Rates. *Society of Petroleum Engineers*, page SPE 75183, 2002.
- G. CHAUVETEAU et N. KHOLER : Influence of Microgels in Polysaccharide Solutions on Their Flow Behavior Through Porous Media . *SPE Journal*, pages 361–368, 1984.

- G. CHAUVETEAU, L. NABZAR, Y. EL ATTAR et C. JACQUIN : Pore Structure and Hydrodynamics in Sandstones. *In SCA 9607 - Int. Symp. of the Society of Core Analysts, Montpellier (France) 8-10 September, 1996.*
- G. CHAUVETEAU, A. OMARI, R. TABARY, M. RENARD, J. VEERAPEN et J. ROSE : New Size-Controlled Microgels for Oil Production. *Society of Petroleum Engineers - SPE 64988, 2001.*
- G. CHAUVETEAU et C. THIRRIOT : Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite de la loi de Darcy. *La Houille Blanche, 2:141-148, 1967.*
- G. CHAUVETEAU et A. ZAITOUN : Basic Rheological Behavior of Xanthan Polysaccharide Solutions in Porous Media : Effects of Pore Size and Polymer Concentration. *Society of Petroleum, 1981.*
- Y. COHEN et A.B. METZNER : Slip phenomena in polymeric solutions flowing through small channels. *The American Institute of Chemical Engineers*, pages 77-85, 1982.
- M.E. COLES et K.J. HARTMAN : Non-Darcy Measurements in Dry Core and the Effect of Immobile Liquid. *SPE, 39977, 1998.*
- D. CORNELL et D.L. KATZ : Flow of Gases Through Consolidated Porous Media. *Ind. and Eng. Chem., 45:2145, 1953.*
- J.R. COUNCIL : *Steam-Water Relative Permeability*. Thèse de doctorat, University of Stanford, 1979.
- R.A. DAWE et Y. ZHANG : Mechanistic study of the selective action of oil and water penetrating into a gel emplaced in a porous medium. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 12:113-125, 1994.*
- R. DAWSON et R.B. LANTZ : Inaccessible Pore Volume in Polymer Flooding. *SPE Journal*, pages 448-452, 1972.
- C. DEREK, TRETHERWAY, L.X. LIU et C.D. MEINHART : Analysis of Slip Flow in Microchannels. *University of California, 2002.*
- P. ELMKIES : *Modification des propriétés polyphasiques des roches après adsorption de polymères*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2001.
- Ph. ELMKIES, H. BERTIN, D. LASSEUX, M. MURRAY et A. ZAITOUN : Further Investigations on Two-Phase Flow Property Modification by Polymer : Wettability Effects. *Society of Petroleum Engineers*, page SPE 64986, 2001.
- Ph. ELMKIES, D. LASSEUX, T. PICHERY et A. ZAITOUN : Polymer effect on Gas/Water Flow in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*, page SPE 75160, 2002.

- T. ERTEKIN, G.R. KING et F.C SCHWERER : Dynamic Gas Slippage : A Unique Dual-Mechanism Approach to the Flow of Gas in Tight Formations. *SPE Formation Evaluation - SPE 12045*, 1986.
- R.D. EVANS, C.S. HUDSON et J.E. GREENLEE : The Effect of an Immobile Liquid Saturation on the Non-Darcy Flow Coefficient in Porous Media. *SPE Production Engineering*, 14206, November 1987.
- M. FIRDAOUSS et J.L. GUERMOND : Sur la correction non linéaire de la loi de Darcy pour les écoulements en milieu poreux à faible nombre de Reynolds. *In Congrès Inter. sur la modélisation en milieux poreux, St Etienne*, 1995.
- P.J. FLORY : *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell University Press, 1953.
- P. FORCHHEIMER : Wasserbewegung Durch Boden. *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 45:1782–1788, 1901.
- J. GEERTSMA : Estimating the Coefficient of Inertial Resistance in Fluid Flow Through Porous Media. *paper SPE*, 29(9):3169–3178, 1974.
- L. GREEN et P. DUWEZ : Fluid Flow Through Porous Media. *J. Appl. Mech.*, 18:39, 1951.
- J. HAPPEL et H. BRENNER : Low reynolds number hydrodynamics. *Kluwer Academic Publisher*, 1991.
- W.N. HERKELRATH, A.F. MOENCH et C.F. O'NEAL : Laboratory Investigation of Steam Flow in a Porous Medium. *Water Resources Research*, 19-4:931–937, 1983.
- L. KEWEN et N. ROLAND : Accurate Measurement of Steam Flow Properties. *In Annual Meeting On October 17-20, Reno, USA*, 1999.
- L.J. KLINKENBERG : The permeability of porous media to liquids and gases. *Drill Prod. Prac.*, API:200–213, 1941.
- M. KNUDSEN : The kinetic theory of gases. *Methuen, London, Third edition*, 1950.
- N. KOHLER, R. RAHBARI et A. ZAITOUN : Weak Gel Formulation for Selective Control of Water Production in High-Permeability and High-Temperature Production Wells. *Society of Petroleum*, SPE 25225, 1993.
- D. LASSEUX, M. QUINTARD et S. WHITAKER : Determination of Permeability Tensors for Two-Phase Flow in Homogeneous Porous Media : Theory. *Transport in Porous Media*, 1996.
- K. LI et R.N. HORNE : Experimental Study of Gas Slippage in Two-Phase Flow. *Reservoir Evaluation and Engineering*, page SPE 89038, 2004.
- J. LIANG et R.S. SERIGHT : Wall Effect Gel Droplet Model of Disproportionate Permeability Reduction. *SPE*, 59344, 2000.

- J.T. LIANG, H. SUN et R.S. SERIGHT : Why do gels reduce water permeability more than oil permeability ? *Society of Petroleum*, page SPE/DOE 27829, 1994.
- LINDQUIST : *In 1er Congrès des Grands Barrages, Stockholm, 1933.*
- C. MARLE : *Les Écoulements Polyphasiques En Milieu Poreux, Cours de Production, IV.* Editions Technip, 1972.
- V. MÉDOUT-MADÈRE, A. EL GHAZAOUI, C. CHARNAY, J.M. DOUILLARD, G. CHAUVETEAU et S. PARTYKA : *Surface Heterogeneity of Passively Oxidized Silicon Carbide Particles : Hydrophobic-Hydrophilic Partition.* J. Coll. Int. Sc. - April, 2000.
- C.C. MEI et J. AURIAULT : The effect of weak inertia on flow through a porous medium. *J. Fluid Mech.*, 222:647–663, 1991.
- A. MENNELLA, L. CHIAPPA, S.L. BRYANT, et G. BURRAFATO : Pore-Scale Mechanism for Selective Permeability Reduction by Polymer Injection. *SPE*, 39634, 1998.
- M. MUSKAT : The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. *In McGraw-Hill, New York, 1937.*
- S. NILSSON, A. STAVLAND et H.C. JONSBRAATEN : Mechanistic Study of Disproportionate Permeability Reduction. *SPE*, 39635, 1998.
- M. QUINTARD et S. WHITAKER : Two-phase flow in heterogeneous porous media : The method of large scale averaging. *Transport in Porous Media*, 3:357–413, 1988.
- M. QUINTARD et S. WHITAKER : Two-phase flow in heterogeneous porous media : Numerical experiments for flow perpendicular to a stratified medium. *Transport in porous media*, 5:429–472, 1990a.
- M. QUINTARD et S. WHITAKER : Two-phase flow in heterogeneous porous media : The influence of large spatial and temporal gradients. *Transport in Porous Media*, 5:341–379, 1990b.
- REYNOLDS : An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels. *Royal Society*, 1883.
- C. SATIK et R.N. HORNE : Measurement of Steam-Water Relative Permeability. *In quarterly report of the Stanford Geothermal Program, January-March 1998*, 1998.
- G. SCHNEEBELI : Expériences sur la limite de la validité de la loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration. *La Houille Blanche*, 2:141, 1955.
- F.N. SCHNEIDER et W.W. OWENS : Steady-state measurements of relative permeability for polymer-oil systems. *Society of Petroleum Engineers Journal*, pages 79–86, 1982.

- B. SEBILLE : *Solubilité des polymères*. G. Champetier, Hermann, 1972.
- R.S. SERIGHT : Reduction of gas and water permeabilities using gels. *Society of Petroleum*, SPE 25855, 1993.
- E. SKJETNE et J.L. AURIAULT : Homogenization of Wall-Slip Gas Flow Through Porous Media. *Transport in Porous Media*, 36:293–306, 1999.
- D.D. SPARLIN et R.W. Jr. HAGEN : Controlling water in producing operations. *World Oil*, pages 137–142, 1984.
- R. TABARY : Communication personnelle. 2004.
- M. TISS et R.D. EVANS : Measurement and Correlation of Non-Darcy Flow Coefficient in Consolidated Porous Media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 3:19–33, 1989.
- S. WHITAKER : Flow in Porous Media : A Theoretical Derivation of Darcy's Law. *Transport in Porous Media*, 1:3–35, 1986.
- J.L. WHITE, J.E. GODDARD et H.M. PHILLIPS : Use of polymers to control water production in oil wells. *Journal of Petroleum Technology*, pages 143–150, 1973.
- N. ZABARAS et D. SAMANTA : A stabilized volume-averaging finite element method for flow in porous media and binary alloy solidification processes. *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 60-5:1–38, 2004.
- A. ZAITOUN, H. BERTIN et D. LASSEUX : Two-Phase Flow Property Modifications by Polymer Adsorption. In *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa (USA) 19-22 April*, 1998.
- A. ZAITOUN et N. KOHLER : Two-Phase Flow Through Porous Media : Effect of an Adsorbed Polymer Layer. *paper SPE 18085*, 1988.
- A. ZAITOUN et N. KOHLER : Modification of Water/Oil and Water/Gas Relative Permeabilities after Polymer Treatment of Oil or Gas Wells. *In situ*, 13(1/2):55–77, 1989.
- A. ZAITOUN et N. KOHLER : *Production Well Water Shut-off Treatments by weak Polymer Gels*, volume 2. Elsevier Applied Science Publishers, 2000.
- A. ZAITOUN, N. KOHLER, D. BOSSIE-CODREAU et K. DENYS : Water Shutoff by Relative Permeability Modifiers : Lessons from Several Field Applications. *Society of Petroleum*, SPE 56740, 1999.
- A. ZAITOUN, N. KOHLER et Y. GUERRINI : Improved Polyacrylamide Treatments for Water Control in Producing Wells. *Journal of Petroleum Technology*, July 1991.
- A. ZAITOUN, T. PICHERY, R. TABARY, D. DING et N. BLIN : Prévention des venues d'eau et de sable sur le stockage de gaz de Germigny (GDF) ; Etude préparatoire et traitement du puit CR-24. *rapport 56 774*, 2002.

- C. ZARCONE et R. LENORMAND : Détermination expérimentale du couplage visqueux dans les écoulements diphasiques en milieux poreux. *C. R. Acad. Sci. Paris*, pages 1429–1435, 1994.
- C.G. ZHENG, B. L. GALL, H.W. GAO, A.E. MILLER et R.S. BRYANT : Effects of Polymer Adsorption and Flow Behavior on Two-Phase Flow in Porous Media. *paper SPE*, 39632, 1998.