

THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

Par **Fabrice PAIROYS**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **MÉCANIQUE**

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DES
ÉCOULEMENTS EAU/HUILE DANS LES MILIEUX POREUX
VACUOLAIRES**

Soutenue le 23 Septembre 2004, devant le jury d'examen :

MM.	O. ATTEIA, Professeur des Universités, Bordeaux 3	Rapporteur
	M. QUINTARD, Directeur de recherche CNRS, Toulouse	Rapporteur
	E. ARQUIS, Professeur des Universités, Bordeaux I	Président du jury
	H. BERTIN, Directeur de recherche CNRS, Bordeaux I	Directeur de thèse
	D. LASSEUX, Chargé de recherche CNRS, Bordeaux I	Co-encadrant
	O. VIZIKA, Ingénieur de recherche IFP, Rueil-Malmaison	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer de très sincères remerciements à Henri Bertin et Didier Lasseux pour avoir dirigé cette thèse. Leurs conseils, leurs soutiens et surtout leurs patiences m'ont permis de mener à bien ce travail. Un remerciement tout spécial à mon professeur de Mécanique des Fluides, Jean-Rodolphe Puiggali, directeur du TREFLE, qui m'a accueilli chaleureusement dans son laboratoire. Merci également à tous les permanents qui ont, de près ou de loin, suivi mon travail.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde reconnaissance aux personnes qui m'ont fait l'honneur de constituer le jury de ma thèse, notamment à Eric Arquis, président du jury. Je suis également redevable à l'Institut Français du Pétrole.

Je ne saurais oublier tous ceux qui m'ont accompagné au cours de mon travail :

- Cyril Caubit (alias Vomito) pour tous nos échanges scientifiques et « extra-scientifiques ». Partager son bureau et les troquets a été chose aisée (bon courage pour ta soutenance Croque-maïs). Rendez-vous au Break Pub ou à l'Austin,
- Geoffroy Rousseaux avec un x (alias Fougniasse) pour ses contrepèteries fantastiques, pour ce petit vent frais de Bourgogne,
- Les Marseillais (personne n'est parfait!! Jilo et Zouzou), qui n'ont toujours pas compris que le FCGB (Girondins de Bordeaux) allait terminer devant l'OM au classement cette année,
- Le Sporting Club de Monségur, toute l'équipe, mes partenaires et amis Bruno (Nono ou Martinez), et Patrice (Mistify) entre autre, compagnons de fêtes avec une spéciale dédicace pour les boîtes de nuit le Maxi-Coucou et la Féria où nous avons fait nos armes ensemble. Félicitations à mon meilleur ami Bruno pour ce bout de chou qui vient de naître,
- Laurent (Pack) et Bruno II (Magic Jordana), pour leur humour unique et leurs aventures rocambolesques lors de leurs livraisons de colis (Força La Poste !!),
- Mes amis des années lycée, Fabien (Fion), Stéphan (Bart) et Christophe (Lolo) et des années fac les 2 Laurent (Pack et Joujou), Thierry (Titi), Bruno (Nono),
- Céline, ma fidèle supportrice dans la phase finale de mon travail,
- Enfin mes parents qui m'ont soutenu durant toutes mes études et qui m'ont fait confiance malgré un parcours parsemé d'embûches. Je leur dois tout et leur souhaite longue vie et bonne santé. Je vous aime. J'ai également une pensée pour toute ma famille et pour nos défunts que je n'oublierai jamais.

MERCI A TOUS

Table des matières

Chapitre 1

1	Lois d'écoulement en milieu poreux.....	1
1.1	Introduction.....	1
1.1.1	Contexte général.....	1
1.1.2	Présentation du sujet.....	4
1.2	Écoulements en milieu poreux homogène.....	5
1.2.1	Lois d'écoulement monophasique.....	7
1.2.2	Lois d'écoulement diphasique	9
1.3	Écoulements en milieu poreux hétérogène.....	14
1.3.1	Écoulements monophasiques en milieu poreux hétérogène.....	15
1.3.2	Écoulements diphasiques en milieu poreux hétérogène.....	17
1.3.3	Écoulements dans les milieux fortement hétérogènes.....	17

Chapitre 2

2	Étude expérimentale des écoulements eau/huile en milieu poreux vacuolaire....	21
2.1	Matériel et méthodes.....	22
2.1.1	Milieux poreux et fluides.....	22
2.1.2	Dispositif expérimental.....	24
2.1.3	Procédure expérimentale.....	27
2.2	Résultats expérimentaux et discussions.....	30
2.2.1	Miniperméamètre et dispersion sur les milieux E5 et E6.....	31
2.2.2	Écoulements diphasiques ($\Delta\rho\neq 0$).....	35
2.2.2.1	Milieu homogène E1	35
2.2.2.2	Milieu vacuolaire E2.....	36
2.2.2.3	Milieu homogène E3.....	44
2.2.2.4	Milieu vacuolaire E4.....	48
2.2.3	Écoulements diphasiques ($\Delta\rho=0$).....	53
2.2.3.1	Milieu homogène E5.....	53
2.2.3.2	Milieu vacuolaire E6.....	56

Chapitre 3

3	Étude numérique des écoulements eau/huile en milieu poreux vacuolaire.....	63
3.1	Description de l'outil de simulation ATHOS.....	64
3.2	Identification 1D des propriétés des milieux homogènes (k_r/P_c).....	65
3.3	Simulations 2D vacuolaires.....	73
3.3.1	Milieu E2.....	75
3.3.1.1	Drainage du milieu E2.....	76
3.3.1.2	Imbibition du milieu E2.....	83
3.3.2	Milieu E4.....	89

3.3.2.1	Drainage du milieu E4.....	89
3.3.2.2	Imbibition du milieu E4.....	92
3.3.3	Milieu E6.....	94
3.3.3.1	Drainage du milieu E6.....	95
3.3.3.2	Imbibition du milieu E6.....	97
Chapitre 4		
4	Conclusions et perspectives.....	103
	Nomenclature	107
	Références bibliographiques	111
	Annexes	

Chapitre 1

1 Lois d'écoulement en milieu poreux

1.1 Introduction

1.1.1 Contexte général

Le contexte général de l'étude concerne les écoulements multiphasiques dans les milieux poreux fortement hétérogènes.

La connaissance du comportement des écoulements dans de tels milieux est essentielle pour l'optimisation de la récupération des hydrocarbures dans les gisements pétroliers ou encore pour la dépollution des sols.

Dans le domaine pétrolier, la nécessité d'une exploitation rationnelle des gisements s'est naturellement imposée. On vise à une rentabilité optimale. Pour cela, trois axes de recherche sont importants :

- l'estimation des volumes d'hydrocarbures en place,
- les réserves récupérables,
- les potentiels de production des puits.

Il est donc nécessaire d'acquérir toutes sortes d'informations sur les gisements. Nous savons que ceux-ci sont formés d'un ou de plusieurs réservoirs souterrains d'origine sédimentaire contenant des hydrocarbures liquides et/ou gazeux. Cette roche réservoir, poreuse et perméable, est limitée par des barrières imperméables, véritables pièges à hydrocarbures.

La connaissance des sites nécessite des analyses (Cossé, 1988). Il en existe de deux types :

- l'analyse indirecte, qui exploite les résultats de diagraphies (logging) pendant le forage mais aussi pendant la production,
- l'analyse directe qui exploite les mesures sur des carottes prélevées au sein du réservoir.

Dans ces réservoirs d'hydrocarbures, les écoulements sont en général polyphasiques. L'écoulement peut mettre en jeu plusieurs phases miscibles ou immiscibles : gaz, huile, eau.

Le modèle d'écoulement multiphasique en milieu poreux classiquement utilisé est le modèle de Darcy généralisé, caractérisé par les relations de perméabilité relative et de pression capillaire (Muskat, 1937), modèle sur lequel nous reviendrons à la fin de ce chapitre. Si ce modèle présente encore quelques difficultés à restituer toute la physique pour un écoulement diphasique en milieu homogène, de nombreuses interrogations restent encore plus ouvertes dans le cas de milieux fortement hétérogènes tels que ceux que nous considérons dans ce travail.

Les forces à prendre en compte lors d'un écoulement monophasique sont dues aux effets de viscosité et de gravité. Lors d'un écoulement multiphasique, il faut rajouter les forces de capillarité provenant de l'existence d'interfaces fluide/solide et fluide/fluide.

Plusieurs modèles de milieux hétérogènes existent voire coexistent dans le sous-sol : on peut par exemple citer les modèles stratifiés, nodulaires ou vacuolaires (Bertin, 1992) : nous nous intéressons ici au cas vacuolaire.

Les milieux poreux vacuolaires se rencontrent souvent dans les formations carbonatées et en particulier dans les dolomies et les calcaires. Ces réservoirs ont une importance toute particulière dans l'ingénierie pétrolière (Archie, 1952 ; Lucia, 1999).

Ces milieux sont formés d'une matrice poreuse homogène dont la dimension des pores est de l'ordre du micromètre. Cette région continue est parsemée de pores de grande taille appelés les vacuoles, dont la taille peut atteindre plusieurs centimètres. A titre d'illustration de la structure, la figure 1.1 qui suit représente une roche vacuolaire où l'on distingue clairement les deux régions matrice/vacuoles :

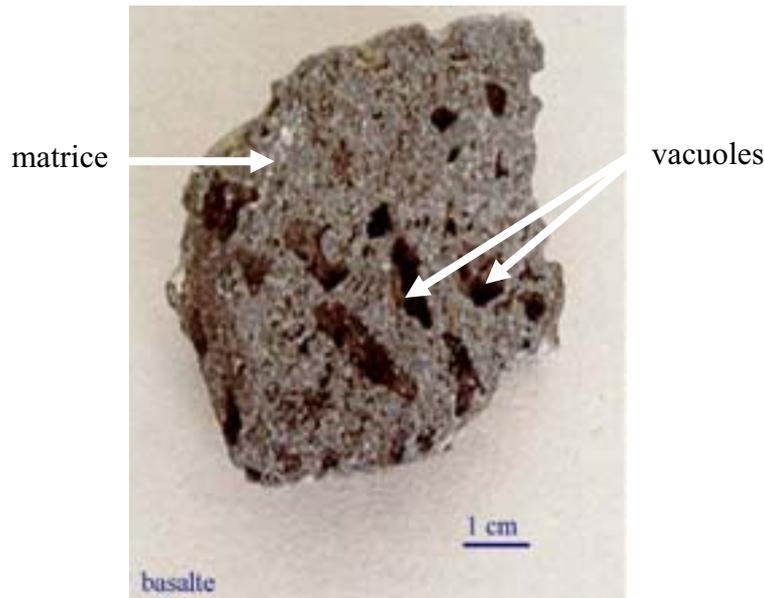


Figure 1.1. Basalte vacuolaire.

Les vacuoles présentes dans ce basalte sont issues du piégeage de gaz lors de la solidification de la roche. Pour les roches carbonatées, elles proviennent de processus géochimiques complexes (diagenèse, dégradation de matières organiques piégées dans le sol). Les vacuoles sont plus ou moins connectées entre elles selon les types de roche.

Du fait de leur structure complexe et particulière, la détermination des propriétés de transport mérite une attention spéciale qui nécessite une bonne description des écoulements à plusieurs phases, notamment diphasique.

En s'intéressant simplement aux écoulements monophasiques, deux questions d'importance apparaissent : le choix de modèles d'écoulement adéquats pour les deux zones et les conditions à la limite fluide/poreux (Neale et Nader, 1973 ; Arquis, 1994 ; Lasseux et al., 2002).

Dans le cas diphasique, plusieurs travaux ont déjà été réalisés. Ehrlich (1971) a réalisé une première analyse d'échantillons vacuolaires qui a montré que le comportement des perméabilités relatives dépendait de la connectivité entre le système intergranulaire et les structures vacuolaires. Il a également développé un modèle de réseau 2D permettant de prédire les perméabilités relatives. De Zabala et al. (1995) ont révélé que les méthodes conventionnelles de description physique des écoulements étaient insuffisantes pour caractériser les carbonates vacuolaires. Dans leur travail, ils ont utilisé la technique de tomographie par rayons X pour suivre l'évolution des saturations locales. Dauba et al. (1998)

ont mis en évidence des comportements anormaux des perméabilités relatives en interprétant les données de production. Ils ont également reconstruit la carte 3D de perméabilité d'un milieu vacuolaire par une technique stochastique. Kamath et al. (2001) ont réalisé des études sur des calcaires et ont montré que la saturation résiduelle en huile, déterminée par tomographie par rayons X, variait selon le type de structure vacuolaire. Moctezuma-Berthier et al. (2002) ont effectué des expériences diphasiques sur deux calcaires de mêmes propriétés macroscopiques mais de structures de pores différentes et ont montré que les processus de déplacement étaient influencés par le niveau d'interconnexion des vacuoles. A partir de modèles reconstruits, Moctezuma-Berthier et al. (2004) ont également observé que, par rapport à des modèles unimodaux, les calculs de pression capillaire sont fortement influencés par la présence d'un système vacuolaire percolant, et que la perméabilité relative de la phase non mouillante est accrue même si le système est non percolant.

Malgré tous ces résultats, les différents travaux décrits précédemment ont montré que la question de la description des écoulements dans les milieux poreux vacuolaires reste ouverte.

D'un point de vue général, une description physique correcte des écoulements diphasiques dans un système poreux hétérogène avec une région fluide et une région poreuse est nécessaire.

1.1.2 Présentation du sujet

Dans notre étude, nous nous intéressons aux écoulements diphasiques eau/huile dans des milieux modèles vacuolaires artificiels à géométrie contrôlée. Trois vacuoles cylindriques sont placées périodiquement sur un échantillon de section carrée. Notre choix s'est porté sur des grès naturels des Vosges qui ont la particularité d'être relativement homogènes et faiblement perméables donc capillaires. Cette dernière caractéristique est importante dans la suite de notre étude : en effet, un contraste de pression capillaire entre la zone matricielle et la zone vacuolaire est recherché.

Les vacuoles sont équipées d'un système de visualisation permettant une observation directe des processus de remplissage et de la phénoménologie de l'écoulement.

Des expériences de drainage et d'imbibition sont réalisées à la fois sur les milieux matriciels homogènes et vacuolaires. Du point de vue de la description physique, une approche de type loi de Darcy généralisée utilisée classiquement sur les milieux poreux

hétérogènes est considérée. La question d'un choix correct de pression capillaire P_c et de perméabilités relatives k_r dans la région vacuolaire se pose.

Dans le but d'évaluer l'influence de la gravité lors des écoulements polyphasiques en milieu poreux vacuolaire, deux couples de fluides eau/huile ont été utilisés : un premier tel que les masses volumiques soient différentes ($\Delta\rho\neq 0$) et un deuxième tel que les masses volumiques soient égales ($\Delta\rho=0$). Les grandeurs physiques qui sont mesurées lors des expériences sont :

- les saturations en eau (S_w) et en huile (S_o) au cours du temps,
- la récupération,
- la différence de pression entrée/sortie ΔP du milieu.

Toutes ces données acquises par un système automatisé permettent de caractériser les différents échantillons (homogènes ou vacuolaires).

La simulation numérique des écoulements en milieu poreux vacuolaire se fera en faisant l'hypothèse que le milieu peut être assimilé à un milieu fortement hétérogène composé de deux régions, matrice et vacuole, où le modèle de Darcy généralisé est considéré comme valide. L'objectif de notre étude est donc de déterminer les propriétés polyphasiques, perméabilités relatives et pression capillaire, qui permettent de décrire au mieux les écoulements. Pour ce faire, nous utilisons un logiciel commercial, ATHOS, fourni par L'IFP et BEICIP-FRANLAB, simulateur de réservoir possédant une option laboratoire qui sera décrit plus en détails dans le chapitre 3. Les simulations numériques sont effectuées en deux étapes. Une première étape de simulation du cycle drainage/imbibition effectué sur le milieu poreux homogène qui constituera la matrice du milieu vacuolaire. Une deuxième étape de simulation directe du cycle drainage/imbibition effectué sur le milieu vacuolaire. Les propriétés polyphasiques de la matrice ayant été déterminées à l'étape précédente, on s'attachera à déterminer le triplet k_{rw} , k_{ro} et P_c des vacuoles qui permet de décrire au mieux l'écoulement dans le milieu vacuolaire.

1.2 Ecoulements en milieu poreux homogène

La pétrophysique est la science traitant les caractéristiques physiques des roches (Cossé, 1988 ; Monicard, 1975). Certaines de ces roches, appelées roches réservoirs, possèdent une capacité de stockage de fluides : cette propriété est caractérisée par la porosité. La perméabilité définit quant à elle, la capacité des fluides à circuler dans le milieu. On

introduit de façon générale les perméabilités relatives lors des écoulements à plusieurs phases. Quand plusieurs fluides se retrouvent simultanément présents dans le réservoir, on parle alors de saturation en fluides.

Une description générale des différentes échelles intervenant dans la description des écoulements en milieu poreux est d'abord présentée.

Plusieurs échelles d'observation interviennent dans la modélisation des écoulements de fluides en milieu poreux :

- L'échelle du pore ou microscopique dont la dimension caractéristique est celle des pores (de l'ordre du micromètre). L'écoulement des fluides peut être décrit par les équations de Stokes,
- L'échelle locale ou de Darcy dont la dimension caractéristique est de l'ordre du millimètre ou du centimètre. La loi de Darcy et son extension (loi de Darcy généralisée) permettent de décrire respectivement les écoulements monophasiques et polyphasiques,
- La grande échelle ou échelle du milieu poreux hétérogène qui correspond à une échelle supérieure à l'échelle locale.

Il existe d'autres échelles d'observation mais nous nous intéresserons dans cette étude, qu'aux trois échelles citées précédemment.

On introduit le concept de volume élémentaire représentatif (V.E.R.) pour déduire les propriétés macroscopiques à partir du modèle microscopique. Ce V.E.R. doit être choisi de telle manière que le volume soit suffisamment grand pour moyenniser la propriété mais également assez petit pour définir la propriété en question à l'échelle locale.

Dans l'exemple représenté par la figure 1.2, on s'intéresse à la détermination de la porosité moyenne ε d'un milieu poreux. On introduit une porosité locale définie comme la porosité d'un élément de volume sphérique de rayon r . Si r est inférieur à r_1 ou supérieur à r_2 , la porosité n'est pas constante et ne représente donc pas la porosité du milieu à l'échelle considérée. La porosité locale n'a de sens que si $r_1 \ll r \ll r_2$.

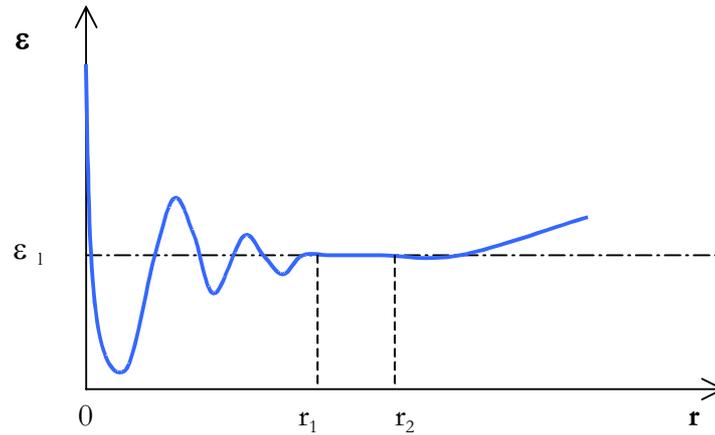


Figure 1.2. Variation de la porosité et concept de V.E.R.

Cette porosité moyenne ε est déterminée par le rapport du volume de vides appelé volumes de pores VP et du volume total V_t de l'échantillon :

$$\varepsilon = \frac{VP}{V_t} \quad (1.1)$$

Cette propriété physique rend compte de la capacité de stockage de la roche réservoir.

Pour la détermination de cette porosité, deux méthodes seront utilisées par la suite :

- Mesure globale. On détermine la porosité à partir de la mesure du volume total de l'échantillon V_t , et du volume de pores VP. Ce volume de pores est déterminé par pesée. La formule (1.1) permet alors d'obtenir la porosité.
- Mesure locale à partir de la technique d'atténuation d'un rayonnement γ , décrite en détails dans le paragraphe 2.1.2.

1.2.1 Loix d'écoulement monophasique

On considère ici un écoulement isotherme, rampant et stationnaire d'un fluide newtonien et incompressible dans un milieu poreux homogène. On détaille les loix d'écoulement à l'échelle du pore et à l'échelle locale.

Description à l'échelle du pore

L'écoulement décrit précédemment est régi par l'équation de Stokes :

$$-\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (1.2)$$

à laquelle on associe l'équation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1.3)$$

où P , ρ , μ représentent respectivement la pression, la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide considéré, \mathbf{g} représente le vecteur accélération de la pesanteur et \mathbf{v} le vecteur vitesse du fluide.

A l'interface fluide/solide, on ajoute une condition de non glissement :

$$\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (1.4)$$

Description à l'échelle locale (ou de Darcy)

Le passage de l'échelle du pore vers l'échelle locale peut se faire à l'aide de méthodes de changement d'échelle telle que l'homogénéisation (Bourgeat et al., 1988 ; Saez et al., 1989) ou la prise de moyenne volumique (Quintard and Whitaker, 1987) des équations qui régissent l'écoulement à l'échelle du pore.

La prise de moyenne de l'équation de Stokes (1.2) permet d'obtenir l'équation de Darcy (Whitaker, 1986) :

$$\mathbf{v} = \frac{-\mathbf{K}}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (1.5)$$

où \mathbf{v} est le vecteur vitesse de filtration ou vitesse de Darcy, \mathbf{g} le vecteur accélération de la pesanteur, μ est la viscosité dynamique du fluide, ρ sa masse volumique, P la pression et \mathbf{K} le tenseur de perméabilité. La perméabilité est une caractéristique du milieu poreux qui rend compte de l'aptitude du fluide à s'écouler. En système pratique, l'unité de perméabilité est le Darcy et est reliée à l'unité SI par la relation suivante : $1 \text{ mD} = 0,987 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Le tenseur \mathbf{K} est une grandeur intrinsèque du milieu poreux qui ne dépend que de la topologie.

Ce tenseur tient compte de l'anisotropie éventuelle du milieu : dans notre étude, comme les milieux sont supposés isotropes et que l'écoulement est unidirectionnel, le tenseur

se réduit à un scalaire noté k appelé perméabilité absolue. Si l'écoulement est unidirectionnel, horizontal et si les forces de pesanteur sont négligées, l'équation (1.5) est alors simplifiée :

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1.6)$$

Si l'on suppose un écoulement de fluide avec un débit volume Q dans un milieu de section A , de longueur L et en notant ΔP la perte de charge entre l'entrée et la sortie du milieu, l'intégration de l'équation (1.6) donne le modèle de Darcy 1D (Darcy, 1856) :

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (1.7)$$

1.2.2 Loïs d'écoulement diphasique

Nous nous plaçons toujours dans une configuration d'écoulement isotherme, rampant et stationnaire mais cette fois-ci en présence de deux fluides newtoniens, incompressibles et immiscibles dans un milieu poreux homogène. On détaille une nouvelle fois, les loïs d'écoulement à l'échelle du pore et à l'échelle locale.

Description à l'échelle du pore

Comme pour le cas monophasique, l'écoulement pour chaque phase 1 et 2 est régi par une équation de Stokes et une équation de conservation de la masse :

$$-\nabla P_i + \rho_i \mathbf{g} + \mu_i \nabla^2 \mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (1.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_i = 0 \quad (1.9)$$

pour $i=1,2$.

Les conditions aux limites à prendre en compte sont les conditions de non glissement aux parois pour les deux fluides i et la condition de vitesse équivalente des deux fluides à leur interface :

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2 \quad (1.11)$$

pour $i=1,2$.

Pour des écoulements polyphasiques, il faut également ajouter une condition à la limite exprimant la différence de contrainte normale à l'interface des deux fluides. Elle s'exprime en fonction du rayon de courbure R de l'interface et de la tension interfaciale σ entre les phases fluides. Dans notre étude, nous nous limitons au cas diphasique :

$$\mathbf{n}(\boldsymbol{\Sigma}_1 - \boldsymbol{\Sigma}_2) = \frac{\sigma}{R} \mathbf{n} \quad (1.12)$$

avec \mathbf{n} la normale à l'interface et $\boldsymbol{\Sigma}_i$ le tenseur de contraintes associé aux phases 1 et 2 défini par :

$$\boldsymbol{\Sigma}_i = -P_i \mathbf{I} + \mu_i (\nabla \mathbf{v}_i + \nabla^t \mathbf{v}_i) \quad (1.13)$$

pour des fluides newtoniens notés 1 et 2.

Les forces de tension interfaciale σ (N.m^{-1}) résultent d'un déséquilibre entre les forces répulsives et attractives qui s'exercent entre chaque fluide et le solide en présence. On introduit ainsi le concept de mouillabilité.

Prenons l'exemple du contact entre deux fluides immiscibles notés 1 et 2 et un solide S . A l'échelle moléculaire, la zone entre les deux fluides correspond à une zone de mélange où coexistent des molécules de fluide 1 et des molécules de fluide 2. Cette zone de mélange, appelée interphase, est peu pratique du point de vue de la Mécanique des Milieux Continus. On remplace donc cette interphase par une surface sans épaisseur, une interface d'après le modèle de Gibbs (Gibbs, 1878). L'angle de contact θ , défini par l'angle entre la surface solide et l'interface, permet de définir la mouillabilité des fluides 1 et 2 vis-à-vis du solide S (Figure 1.3).

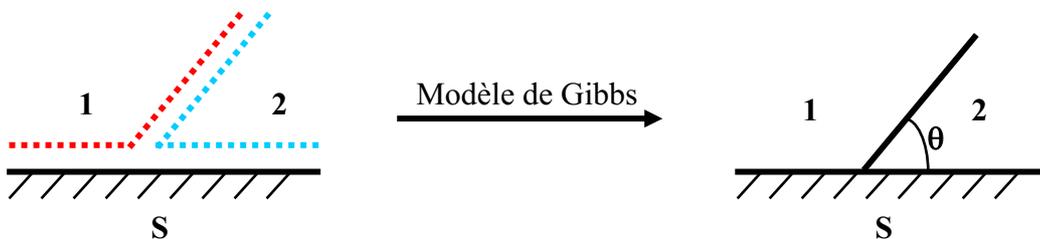


Figure 1.3. Angle de contact θ entre le solide S et l'interface 1/2.

Si $\theta < \pi/2$, le fluide 2 est préférentiellement mouillant pour le solide S par rapport au fluide 1.

Si $\theta > \pi/2$, le fluide 1 est préférentiellement mouillant pour le solide S par rapport au fluide 2.

Si $\theta = 0$, alors le fluide 2 est parfaitement mouillant pour le solide S et le fluide 1 est parfaitement non mouillant.

Enfin, nous avons un dernier cas tel que $\theta = \pi/2$, où aucun des deux fluides 1 et 2 ne sont préférentiellement mouillant.

N.B. : la ligne de contact entre l'interface et le solide est appelé ligne triple.

La mouillabilité joue un rôle important dans la répartition des phases à l'échelle du pore. Elle permet également de faire la distinction entre deux types de déplacement :

- le drainage, qui consiste à déplacer un fluide mouillant par un fluide non mouillant,
- l'imbibition, qui consiste à déplacer un fluide non mouillant par un fluide mouillant.

Dans notre étude, le nombre capillaire Ca ($Ca = \mu V / \sigma$) est petit : cela revient à dire que les forces interfaciales sont prépondérantes par rapport aux forces visqueuses. De ce fait, les termes dynamiques de l'équation (1.13) sont négligeables. Si on définit la pression capillaire P_c comme la différence de pression entre une phase non mouillante 2 et une phase mouillante 1, on aboutit à l'équivalence suivante :

$$P_c = P_2 - P_1 = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.14)$$

Cette pression capillaire est directement liée à la saturation mais dépend également de la façon dont les deux fluides ont été mis en place (historique de la mise en place).

Si le fluide saturant est mouillant, il n'est déplacé par l'autre fluide que si l'on impose à celui-ci un excès de pression au moins égal à la pression capillaire pour les plus gros pores. Par contre, si le fluide saturant est non mouillant, il est déplacé spontanément par le deuxième fluide : on parle d'imbibition spontanée.

Description à l'échelle locale (ou de Darcy)

Le système d'équation qui permet de décrire l'écoulement de deux fluides immiscibles dans un milieu poreux homogène s'écrit de la manière suivante :

$$\mathbf{v}_i = -\frac{\mathbf{K}_i}{\mu_i} (\mathbf{grad}(P_i) - \rho_i \mathbf{g}) \quad (1.15)$$

où \mathbf{v}_i sont les vitesses de filtration des deux fluides ($i = 1,2$). Ce système d'équations est connu sous le nom de loi de Darcy généralisée. Il résulte de la prise de moyenne volumique du système d'équations (1.8) et (1.13) moyennant des hypothèses simplificatrices (Lasseux et al., 1996).

Dans le cas particulier qui nous concerne, les forces de pesanteur sont négligées et l'écoulement est horizontal unidirectionnel. L'équation (1.15) devient alors :

$$v_i = \frac{Q_i}{A} = \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\Delta P_i}{L} \quad (1.16)$$

Dans cette équation la perméabilité effective k_i dépend essentiellement de la saturation, du nombre capillaire Ca , de l'angle de contact θ et du nombre de Bond Bd ($Bd = \Delta \rho g r^2 / \sigma$).

A l'équation (1.16) doivent être ajoutées des équations de continuité. La première exprime l'hypothèse que les pores du milieu sont entièrement occupés par les deux fluides :

$$S_1 + S_2 = 1 \quad (1.17)$$

S_1 et S_2 sont les saturations en fluides 1 et 2. On définit la saturation S_i en chaque phase fluide i par le rapport entre le volume V_i de fluide i et le volume de pores VP :

$$S_i = \frac{V_i}{VP} \quad (1.18)$$

pour $i=1,2$.

Il est également possible de déterminer les saturations locales en fluide à l'aide de la technique d'atténuation γ (chap.2, formule 2.7).

Deux autres équations expriment la conservation de la masse dans chacun des deux fluides :

$$\operatorname{div}(\rho_i \mathbf{v}_i) + \varepsilon \frac{\partial(S_i \rho_i)}{\partial t} = 0 \quad (i = 1,2) \quad (1.19)$$

où ε correspond à la porosité du milieu considéré.

Comme les fluides sont supposés incompressibles, l'équation (1.19) peut être simplifiée :

$$\operatorname{div} \mathbf{v}_i + \varepsilon \frac{\partial S_i}{\partial t} = 0 \quad (i = 1,2) \quad (1.20)$$

La somme des deux équations issues de la formule (1.20) donne alors l'équation (1.18).

Les mobilités des différents fluides sont décrites par ce qu'on appelle les perméabilités relatives. Elles sont définies par le rapport entre les perméabilités effectives k_i et la perméabilité absolue k du milieu considéré :

$$k_{ri} = \frac{k_i}{k} \quad (i = 1,2) \quad (1.21)$$

Ces perméabilités relatives dépendent de la nature du milieu poreux, de sa mouillabilité vis-à-vis du couple de fluides utilisés, de la saturation en l'un des fluides (par exemple de l'eau pour le cas eau/huile). Les courbes de k_r en fonction de la saturation en fluide mouillant sont généralement utilisées comme paramètres de calage numérique d'une expérience de déplacement.

Deux types de méthodes sont utilisés pour la détermination des k_r :

- une méthode stationnaire : elle consiste à co-injecter les deux fluides en mesurant les pertes de charge dans chaque fluide. On détermine les saturations par bilan de masse et on en déduit les perméabilités effectives et donc les perméabilités relatives k_r à l'aide de la loi de Darcy généralisée et ce, pour différents débits d'injection qui permettent d'atteindre différentes valeurs de saturation. Les courbes complètes de k_r , entre S_{wi} et S_{or} , peuvent ainsi, en principe, être restituées de cette façon,

- une méthode instationnaire : cette méthode, utilisée par la suite, nécessite des simulations numériques. On réalise un drainage ou une imbibition et on mesure les saturations locales par une technique d'atténuation γ ainsi que la différence de pression et la récupération. Puis, par calage numérique on identifie les perméabilités relatives k_r et la pression capillaire P_c . Le simulateur ATHOS, fourni par l'IFP et Beicip-Franlab, sera l'outil qui permettra d'exécuter les simulations.

Enfin, pour déterminer complètement un problème d'écoulement de deux fluides dans un milieu poreux, il faut aussi tenir compte des conditions initiales et des conditions à la limite. En général, à l'instant $t=0$, on connaît les valeurs de S_1 , S_2 , P_1 et P_2 .

On connaît également les saturations finales en chacun des deux fluides en fin de processus de drainage ou d'imbibition. En fin de drainage, on détermine la saturation en fluide mouillant resté piégé. Il s'agit de la saturation irréductible en phase mouillante notée S_{1i} . En fin d'imbibition, on détermine la saturation résiduelle en fluide non mouillant S_{2r} .

Il faut aussi tenir compte des conditions à la limite d'entrée et de sortie des fluides. Sur la face entrée, on impose une condition de débit. Sur la face sortie, on est à pression constante (pression atmosphérique), la pression capillaire est donc nulle.

1.3 Ecoulements en milieu poreux hétérogène

Les hétérogénéités peuvent apparaître sous différentes formes qui peuvent également se composer. Leur complexité et leur diversité nous ont amené à sélectionner trois grands types de milieux hétérogènes : les milieux stratifiés, les milieux nodulaires et les milieux vacuolaires.

Les deux premières catégories de milieux sont à dissocier de la troisième : elles concernent des associations de régions poreuses alors que la catégorie « vacuaire » concerne des associations de régions poreuses et fluide. Les milieux poreux vacuolaires sont considérés comme des milieux fortement hétérogènes du fait d'un important contraste de propriétés physiques entre les zones fluide et poreuses.

1.3.1 Écoulements monophasiques en milieu poreux hétérogène

Nous nous intéressons ici à la détermination de la perméabilité absolue équivalente d'un système composé de plusieurs régions poreuses (stratifiées ou nodulaires) dans le cas d'un écoulement monophasique.

A l'échelle du pore, le modèle d'écoulement monophasique présenté pour les milieux poreux homogènes est toujours valable.

A la grande échelle (échelle du bloc poreux hétérogène dans notre étude), une représentation possible des écoulements monophasiques dans des milieux hétérogènes en terme d'une loi de Darcy à cette même échelle a été mise en évidence (Quintard et Whitaker, 1987). En appliquant la prise de moyenne à grande échelle, le tenseur de perméabilité incluant des hétérogénéités locales a pu être calculé par un problème de fermeture. Des exemples de résolution ont été proposés notamment pour le cas d'un milieu poreux stratifié où chaque strate est supposée homogène et isotrope et où l'écoulement dans chaque strate est régi par la loi de Darcy.

Dans ce paragraphe, nous proposons un modèle 1D basé sur des formules d'associations séries et parallèles de blocs poreux homogènes et isotropes. Ce modèle permet une estimation de la perméabilité absolue équivalente du système hétérogène. La connaissance des dimensions et des perméabilités de chaque bloc est nécessaire et l'écoulement du fluide est considéré unidirectionnel 1D dans notre démarche bien que ce ne soit pas le cas dans la réalité.

La perméabilité absolue globale d'un système de milieux poreux peut être estimée analytiquement à l'aide des formules d'associations séries et parallèles. L'écoulement dans chaque bloc homogène et isotrope est régi par la loi de Darcy. Pour l'association de n blocs en parallèle, la perméabilité équivalente vaut :

$$k_{m1} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (1.22)$$

où h_i et k_i sont respectivement la hauteur et la perméabilité du bloc i .

Pour l'association de n blocs en série, la perméabilité équivalente vaut :

$$k_{m2} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i}} \quad (1.23)$$

où L_i et k_i sont respectivement la longueur et la perméabilité du bloc i .

En assimilant les vacuoles à des milieux poreux, on peut estimer analytiquement la perméabilité globale k_{eq} d'un système poreux/poreux en utilisant les formules d'associations (1.22) et (1.23). Le milieu vacuolaire considéré dans notre étude est composé de trois cellules successives contenant chacune une vacuole. Notre système hétérogène étant périodique, nous nous limitons à l'étude d'une seule cellule (Figure 1.4), où un nodule poreux est contenu dans un bloc poreux continu. Nous assimilons la surface circulaire de la vacuole à un carré. Afin d'approximer au mieux la surface réelle du nodule, une moyenne des perméabilités équivalentes obtenues sur un carré inscrit et un carré circonscrit au nodule est effectuée.

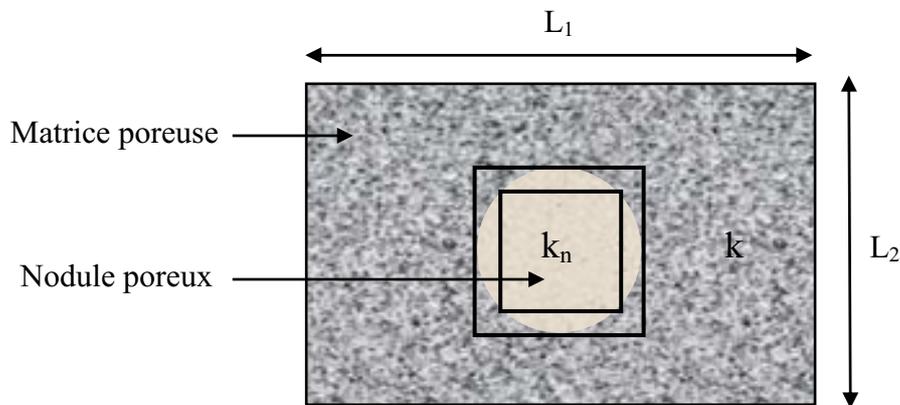


Figure 1.4. Cellule vacuolaire en vue de la détermination de la perméabilité globale k_{eq} .

Les perméabilités k et k_n correspondent respectivement aux perméabilités de la matrice et du nodule. On donne ci-dessous le résultat analytique pour la détermination de la perméabilité globale du milieu. Elle résulte d'une combinaison des formules d'associations série et parallèle (1.22) et (1.23).

En tenant compte du fait que k_n est la moyenne des deux perméabilités obtenues pour chaque carré (inscrit et circonscrit), on obtient alors la forme littérale suivante :

$$k_{eq} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{L_i k [k(L_2 - l_i) + k_n l_i]}{k [l_i L_2 + (L_1 - l_i)(L_2 - l_i)] + k_n [l_i (L_1 - l_i)]} \quad (1.24)$$

avec l_1 et l_2 sont les côtes du carré inscrit et circonscrit.

Cette méthode, ne donne qu'une estimation de la perméabilité absolue équivalente au système. Elle peut générer des erreurs selon les combinaisons d'associations choisies.

1.3.2 Ecoulements diphasiques en milieu poreux hétérogène

Ce paragraphe concerne à présent des écoulements de deux fluides newtoniens, immiscibles et incompressibles dans des milieux poreux hétérogènes.

A l'échelle du pore, le modèle d'écoulement diphasique présenté pour les milieux poreux homogènes est toujours valable.

L'étude préliminaire concernant les écoulements monophasiques en milieux poreux hétérogènes effectuée par Quintard et Whitaker (1987) a été étendue aux écoulements diphasiques. A la grande échelle (échelle du bloc poreux hétérogène), les écoulements diphasiques en milieux hétérogènes peuvent être régis par une loi de Darcy généralisée à cette même échelle. Une méthode de prise de moyenne volumique à l'échelle du bloc poreux hétérogène a permis l'obtention des équations de transport. Les tenseurs de perméabilités et la pression capillaire à l'échelle du bloc poreux ont pu être déterminés en fonction de la fraction volumique en un des fluides. Une étude de milieux stratifiés a été largement détaillée (Quintard et Whitaker, 1988).

1.3.3 Ecoulements dans les milieux fortement hétérogènes

L'intérêt de ce paragraphe est de proposer un modèle simplifié permettant d'estimer la perméabilité globale k_{eq} d'un système vacuolaire composé de deux régions, une région fluide (vacuole) et une région poreuse (matrice).

Pour déterminer la perméabilité équivalente k_v de la vacuole, la configuration est choisie telle que la vacuole n'est plus un nodule poreux comme précédemment mais une zone fluide dont les parois sont poreuses. On suppose par ailleurs que la vacuole est de diamètre

suffisamment grand pour que le régime d'écoulement soit établi, assimilable à un écoulement 1D dans un tube de diamètre d à parois poreuses (figure 1.5).

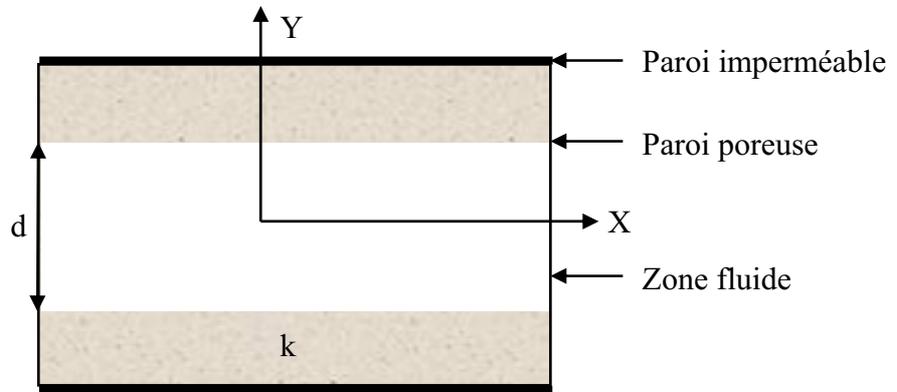


Figure 1.5. Modèle géométrique pour résolution du problème de Stokes.

La résolution d'un problème de Stokes permet d'obtenir la vitesse V_x du fluide s'écoulant dans le canal plan à parois poreuses (Larrea, 1991). Pour résoudre ce problème d'écoulement rampant ($Re \rightarrow 0$), deux approches sont classiquement proposées :

- une première approche couplant la loi de Darcy dans les régions poreuses au modèle de Stokes dans la zone fluide grâce à une relation de glissement de type Beavers-Joseph aux interfaces poreux/fluide (Beavers and Joseph, 1967). Cette relation propose une condition sur la vitesse tangentielle du fluide libre à l'interface côté fluide. On peut notamment citer le travail de Arbogast et Lehr (2002) visant à homogénéiser un système Darcy-Stokes en utilisant cette approche,
- une seconde s'appuyant sur l'équation de Stokes dans la partie fluide et sur l'équation de Brinkman dans la partie poreuse. Excepté dans la zone interfaciale coté région poreuse et sous certaines conditions, les deux démarches conduisent au même résultat. Par la suite, on utilise cette deuxième approche.

En considérant l'équation de Brinkman pour les parois poreuses, on obtient :

$$V_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} \left(y^2 - \frac{d^2}{4} - d\sqrt{k\varepsilon} - 2k \right) \quad (1.25)$$

où k est la perméabilité de la région poreuse et d la hauteur du canal qui n'est autre que le diamètre de la vacuole.

En prenant la moyenne de V_x et par identification avec la loi de Darcy, on définit la perméabilité équivalente k_v de la cavité :

$$k_v = \frac{d^2}{12} + \frac{\sqrt{k\varepsilon}}{2}d + k \quad (1.26)$$

On intègre ensuite ce résultat dans la formule (1.24) en remplaçant le terme k_{eq} par k_v pour obtenir la perméabilité globale k_g du milieu poreux vacuolaire.

La perméabilité globale k_{eq} du milieu vacuolaire peut être également obtenue par mise à l'échelle du modèle de Darcy-Brinkman à l'échelle des vacuoles (Lasseux et al., 2002) :

$$\nabla P - \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\mu \mathbf{v}}{\mathbf{k}} = 0 \Rightarrow \mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla P \quad (1.27)$$

\mathbf{K} est donné par la solution d'un problème de fermeture. Cette solution est obtenue par un schéma de volume fini associé à un algorithme de compressibilité artificielle.

Dans notre cas, le milieu est supposé isotrope, le tenseur de perméabilité s'exprime alors par une grandeur scalaire qui n'est autre que la perméabilité globale du milieu vacuolaire. Dans le cas d'un écoulement unidirectionnel, en notant L la longueur du milieu poreux, A sa section et ΔP la différence de pression entre l'entrée et la sortie du milieu, on retrouve la loi empirique de Darcy modèle 1D :

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\Delta P}{L} \frac{k_{eq}}{\mu} \quad (1.28)$$

Ainsi, pour déterminer la perméabilité globale du milieu poreux vacuolaire initialement saturé en eau, une expérience de type Darcy consistant à imposer des débits d'eau et à relever les différences de pression associées sera réalisée. k_{eq} est alors aisément déterminée.

On adoptera également une loi de type Darcy généralisée pour donner une description macroscopique des écoulements diphasiques dans les milieux poreux vacuolaires.

Ce premier chapitre a proposé des modèles qui permettent de décrire au mieux les écoulements dans des milieux poreux homogènes ou hétérogènes. Il est suivi de trois autres chapitres qui complètent notre étude.

Dans le chapitre 2, on présente une étude expérimentale sur les écoulements eau/huile en milieu poreux vacuolaire. Plusieurs grandeurs physiques telles que les saturations, les différences de pression ou encore la production sont mesurés au cours du temps pour caractériser les écoulements dans les milieux vacuolaires mais aussi dans les milieux homogènes associés. Des interprétations phénoménologiques sont présentées.

Dans le chapitre 3, on réalise une étude, cette fois-ci numérique, sur les écoulements diphasiques en milieu poreux vacuolaire. On identifie dans un premier temps les propriétés k_r/P_c de la matrice du milieu vacuolaire à partir de calages réalisés sur les résultats des expériences effectuées sur les milieux homogènes associés. On poursuit par des simulations numériques 2D dans une configuration vacuolaire, régies par un modèle de Darcy hétérogène (Darcy/Darcy). Pour la région matricielle, on utilise les k_r/P_c déterminées grâce aux calages 1D réalisés dans la configuration homogène. Pour la partie vacuolaire, la pression capillaire P_c est choisie nulle et plusieurs jeux de k_r sont testés. Le but de cette étude est de réaliser des calages expérience/simulation montrant que le choix des k_r dans les vacuoles n'est pas complètement arbitraire.

Le chapitre 4 rassemble les conclusions des chapitres 2 et 3 et apporte un certain nombre de discussions et de perspectives.

Chapitre 2

2 Etude expérimentale des écoulements eau/huile en milieu poreux vacuolaire

L'objectif de ce chapitre est de caractériser les écoulements diphasiques eau/huile dans des milieux poreux vacuolaires modèles. Cette caractérisation, effectuée à l'échelle de la carotte, se limite à des grès d'origine Vosgienne. Les barreaux de grès sont supposés homogènes, isotropes, indéformables, de porosité unimodale de l'ordre de 20%, franchement mouillables à l'eau et de perméabilités absolues comprises entre une dizaine et une centaine de millidarcy. La dimension caractéristique des vacuoles étant largement supérieure à celle des pores de la matrice, un fort contraste de capillarité entre la matrice et les vacuoles est assuré, la pression capillaire étant supposée nulle dans les vacuoles. Les échantillons de grès de section carrée constituent la partie « matrice » du milieu vacuolaire. Afin de faciliter notre étude, la géométrie et la position des vacuoles sont contrôlées. Le choix d'un milieu quasi-périodique à trois vacuoles a été fait dans l'objectif d'homogénéisation du milieu hétérogène. La vacuole centrale ne subit pas les effets d'extrémité, notamment le saut de pression capillaire au niveau de la face de sortie. De part et d'autre des vacuoles, des fenêtres de pyrex sont collées afin de visualiser directement la répartition des fluides.

Des déplacements diphasiques eau/huile (drainages et imbibitions primaires forcés) sont réalisés. Les couples de fluides injectés sont supposés immiscibles et incompressibles. Deux types d'expériences diphasiques sont effectués :

- Drainage/imbibition avec un couple de fluides dont les densités des fluides sont clairement différentes,
- Drainage/imbibition avec un couple de fluides dont les densités sont égales.

Pour réaliser les expériences avec fort contraste de densité entre les fluides ($\Delta\rho\neq 0$), on utilise de l'huile Marcol 52 ESSO et pour l'expérience avec contraste de densité nul ($\Delta\rho=0$), on choisit du dibutyl-phthalate.

Le choix d'expériences avec $\Delta\rho\neq 0$ et $\Delta\rho=0$ est motivé par le fait que les forces de gravité entre les différents fluides doivent jouer un rôle sur l'écoulement et dans la

distribution des phases dans les vacuoles. Les deux huiles sont colorées afin de visualiser les percées et la répartition des fluides dans les vacuoles.

L'effet des forces de gravité entre fluides dans les vacuoles est ainsi mis en évidence. Du point de vue de la description physique, une approche classique de type loi de Darcy généralisée est utilisée. Le comportement hétérogène de ce type de milieu est comparé au comportement d'un milieu homogène issu du même barreau. Les caractéristiques intrinsèques de la matrice du milieu vacuolaire et du milieu homogène sont supposées similaires.

Ces études expérimentales de mécanismes de drainage et d'imbibition permettent une bonne description phénoménologique des écoulements dans les milieux poreux vacuolaires. Dans ce but précis, plusieurs relevés sont effectués : les saturations des fluides sont mesurées par technique d'atténuation d'un rayonnement γ , la différence de pression entrée/sortie est suivie à l'aide d'un capteur différentiel de pression et la production est mesurée par pesée des effluents en sortie, tous ces paramètres étant enregistrés au cours du temps par un système d'acquisition automatisé.

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Milieux poreux et fluides

Milieux poreux

Nous utilisons des grès naturels extraits d'une carrière des Vosges. Trois barreaux différents ont été utilisés : un barreau de couleur grise, un barreau de couleur rouge et un barreau de couleur rouge tacheté. Ils mesurent 0,40 m de longueur et ont une section carrée d'environ 0,0025 m². Chaque barreau est découpé en deux parties : une première, de 0,18 m, constitue le milieu homogène de référence et une deuxième partie de 0,21 m sera utilisée pour la réalisation du milieu vacuolaire.

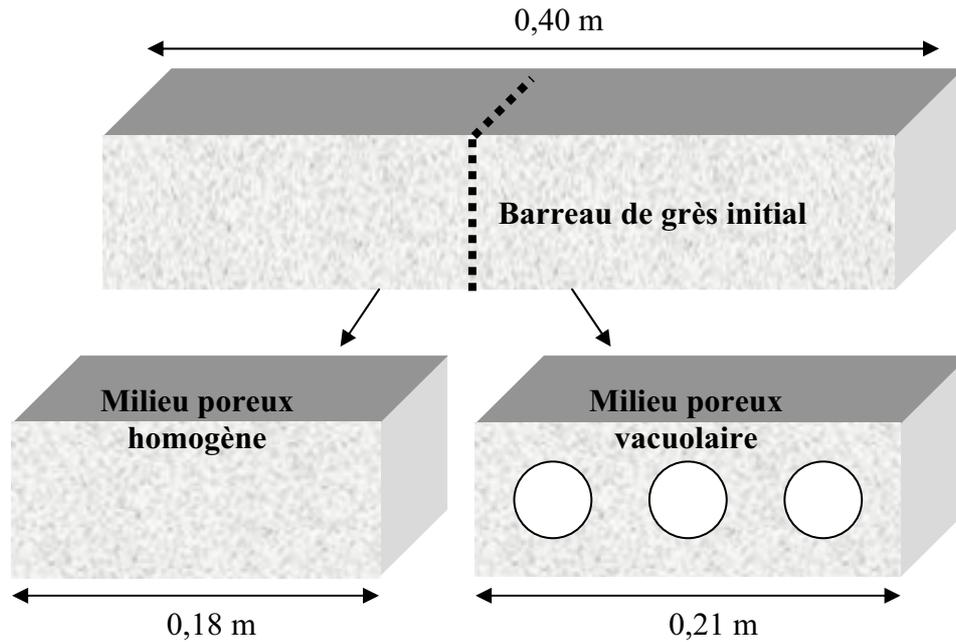


Figure 2.1. Milieux poreux homogène et vacuolaire.

Fluides

Saumure : on utilise de l'eau pure dégazée dans laquelle on ajoute de l'iodure de potassium (KI) à une concentration donnée. Le sel est utilisé pour stabiliser les argiles éventuellement présentes dans le grès et pour augmenter le contraste d'atténuation γ entre l'eau et l'huile et améliorer la précision de la mesure de saturation. De plus, on peut ajuster la concentration en KI de manière à obtenir la même densité entre la saumure et le dibutyl-phthalate.

Huiles : nous avons utilisé deux huiles, de l'huile Marcol 52 (ESSO) et du dibutyl-phthalate dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.1.

	ρ en kg.m^{-3}	μ en Pa.s
Marcol 52 ESSO	831	11.10^{-3}
Dibutyl-phthalate	1045	17.10^{-3}

Tableau 2.1. Propriétés des différentes huiles.

Préparation des milieux vacuolaires modèles

Des flasques d'injection en aluminium sont mis en place de part et d'autre du milieu et sont maintenus par un étau tandis que la surface latérale de l'échantillon est recouverte successivement de colle Araldite[®] et de résine armée de fibres de verre afin d'assurer une

bonne étanchéité et une bonne tenue mécanique. Le milieu est alors perforé et des fenêtres de visualisation en pyrex sont collées de part et d'autre des vacuoles.

Un milieu à trois vacuoles est préparé et dimensionné comme sur la figure 2.2. Le milieu est quasi-périodique : trois cellules identiques composées d'une région matricielle et d'une vacuole se succèdent.

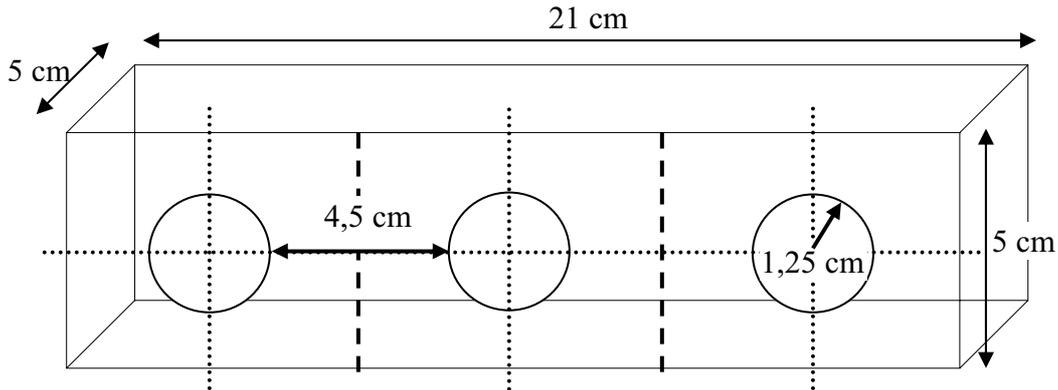


Figure 2.2. Dimensions du milieu modèle à trois vacuoles.

2.1.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental représenté figure 2.3 est constitué d'une pompe volumétrique (Pharmacia P500) permettant la circulation des fluides. Un capteur différentiel de pression (Rosemount gamme 0-3,5 bar) est connecté entre l'entrée et la sortie du milieu. Une balance (Mettler PE6000) permet de mesurer la récupération des effluents. La saturation est mesurée par atténuation γ selon le principe décrit par la suite.

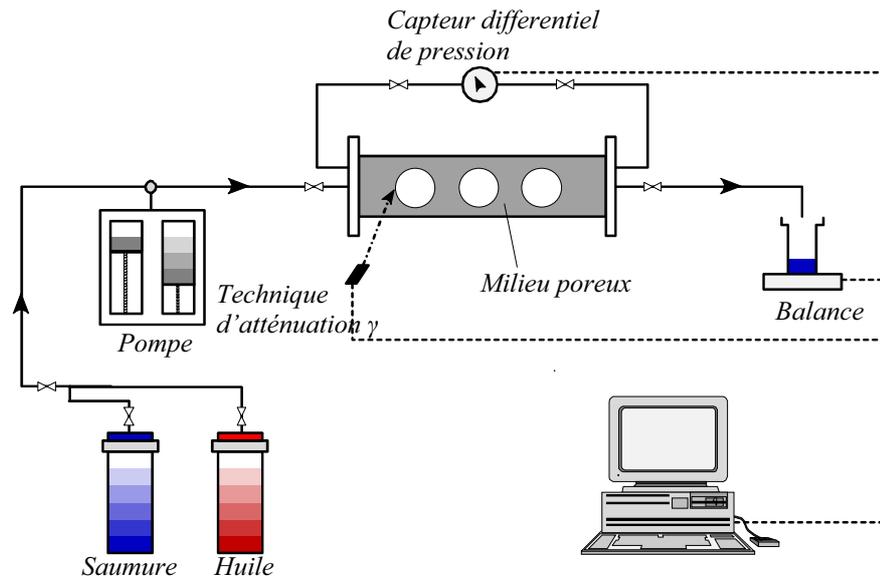


Figure 2.3. Schéma du dispositif expérimental.



Figure 2.4. Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

Spectroscopie γ

La technique d'atténuation γ est bien connue dans la littérature de l'ingénierie pétrolière (Nicholls & Heaviside, 1988), elle est basée sur la comparaison entre les rayons γ émis et transmis au travers d'un milieu poreux.

La spectroscopie γ permet de mesurer la distribution de porosité et les saturations locales dans des milieux poreux saturés par deux phases. Cette méthode, non intrusive, est basée sur le principe d'atténuation des rayons γ . La source radioactive émet des photons à travers le milieu. Le rayonnement traverse l'échantillon et est atténué selon l'épaisseur et la nature du milieu mais aussi selon les différents fluides qui le saturent. Les photons transmis sont comptés à l'aide d'un cristal scintillateur dont le signal est amplifié par un photomultiplicateur.

L'atténuation d'un faisceau incident parallèle et étroit, d'intensité I (eV) constitué de photons γ traversant un absorbant de masse volumique ρ et d'épaisseur dx , est donnée par la loi de Beer :

$$\frac{dI}{I} = -\nu \rho dx \quad (2.1)$$

où ν est le coefficient d'atténuation massique (cm^2/g) dépendant de la nature chimique du milieu et de l'énergie du faisceau incident.

L'intégration de la formule précédente et la connaissance de la relation simple liant l'intensité I , le nombre de particules N ($I=h\xi N$ avec h la constante de Planck et ξ la fréquence de l'émission γ), conduisent à l'équation suivante :

$$N = N_0 \exp(-\nu \rho x) \quad (2.2)$$

où N_0 et N désignent respectivement les nombres de photons émis et transmis. On utilise plus fréquemment le coefficient d'atténuation linéique $a=\nu \rho$ (cm^{-1}) :

$$N = N_0 \exp(-ax) \quad (2.3)$$

Cette loi exponentielle d'atténuation peut être généralisée pour un milieu saturé de plusieurs phases i , d'épaisseur x_i et de coefficient d'atténuation a_i :

$$N = N_0 \exp\left(-\sum_i a_i x_i\right) \quad (2.4)$$

Dans notre dispositif, la source radioactive utilisée est de l'Américium 241 (Am^{241}). Ses caractéristiques sont répertoriées dans le tableau 2.2.

Radioélément	Energie (keV)	Activité (mCi)	Période $\frac{1}{2}$ vie (ans)
Américium	59,6	300	458

Tableau 2.2. Caractéristiques de l'Américium 241.

Pour obtenir une bonne précision de la mesure gammamétrique, il est nécessaire d'effectuer un comptage de référence dans l'air pour étalonner le système avant chaque manipulation. L'émission du rayonnement γ peut être assimilée à une loi de Poisson de sorte que, l'erreur de comptage, ΔN , s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.5)$$

Cette équation indique que la mesure d'une quantité stationnaire sera d'autant meilleure qu'elle est effectuée sur des temps de comptage longs. Dans nos expériences, on optera pour un temps de comptage de 40 secondes tel que le nombre de photons transmis soit supérieur à 10000, ce qui correspond à une erreur relative de comptage inférieur à 1%.

Il faut noter que le dispositif de mesure (émetteur+récepteur) est placé sur un banc permettant des déplacements bidimensionnels selon les axes X et Z (Figure 2.4) et que la température de la salle est constante et égale à environ 22°C.

2.1.3 Procédure expérimentale

Nous décrivons ci-dessous la procédure expérimentale détaillée. Toutes les expériences de déplacements eau/huile sont réalisées avec les axes des vacuoles placés horizontalement selon Y.

1. Après avoir effectué un comptage γ sur le milieu sec, on obtient un vide relatif dans le milieu poreux avant de le saturer en dioxyde de carbone (injection de plusieurs dizaines de volume de pores VP). On procède alors à l'injection de saumure permettant de bien saturer le milieu compte tenu de la miscibilité du CO_2 dans l'eau. Ces opérations sont effectuées sur le milieu placé verticalement et en injectant les fluides par le bas. Lors de la saturation en saumure, on observe un phénomène d'imbibition spontanée. La saumure circulant plus

facilement dans les pores les plus petits, la percée en saumure intervient avant même que la première vacuole rencontrée par le fluide ne soit entièrement remplie.

2. Une fois le milieu entièrement saturé en saumure, la perméabilité absolue est mesurée. Elle est obtenue en imposant différentes valeurs des débits et en relevant les différences de pression entrée/sortie correspondantes. A partir de la loi de Darcy, connaissant la géométrie de l'échantillon et la viscosité du fluide saturant (saumure), la perméabilité absolue est déduite.

A cette même étape, la porosité globale de l'échantillon est déterminée par bilan de masse fluide. Elle est également mesurée par technique d'atténuation γ en des points placés selon un maillage régulier comme représenté sur la figure 2.5. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont en bon accord.

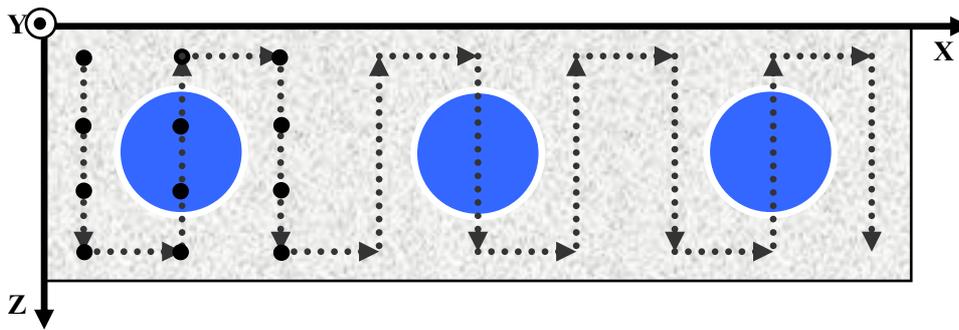


Figure 2.5. Maillage en créneau pour le déplacement du dispositif γ .

Cette mesure s'effectue en deux temps : une mesure sur le milieu sec (N_1) puis sur le milieu saturé en saumure (N_2). On calcule la porosité ε à partir des comptages réalisés et de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{1}{(x_{\text{total}} \cdot a_w)} \text{Ln} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (2.6)$$

N_1 et N_2 sont respectivement les nombres de photons transmis au travers de l'échantillon sec et saturé en saumure, x_{total} est l'épaisseur du milieu traversé et a_w est le coefficient d'atténuation de la saumure.

3. L'huile est injectée à débit constant dans la carotte (Tableau 2.3) afin de déplacer la saumure jusqu'à atteindre la saturation irréductible en eau S_{wi} . Durant cette opération de

drainage où le fluide non mouillant (l'huile) pousse le fluide mouillant (la saumure), les profils de saturation en saumure, la production en effluents et la différence de pression au cours du temps sont mesurés en continu. Les saturations dans les vacuoles peuvent être estimées par visualisation directe. Lorsque l'on observe une production monophasique d'huile, le drainage est terminé. La valeur S_{wi} est évaluée par pesée et par gammamétrie. La perméabilité à l'huile à saturation irréductible en saumure $k_o(S_{wi})$ est déterminée.

Les saturations locales, mesurées par technique d'atténuation γ , sont données par la formule suivante :

$$S_o = \frac{\text{Ln}(N_2/N_3)}{\text{Ln}(N_1/N_2)} \frac{a_w}{(a_o - a_w)} \quad (2.7)$$

N_1 , N_2 et N_3 sont respectivement les nombres de photons transmis au travers de l'échantillon sec, de l'échantillon saturé en saumure et enfin de l'échantillon saturé par les deux phases, a_w et a_o sont respectivement les coefficients d'atténuation de la saumure et de l'huile.

4. Une imbibition est réalisée à débit constant. Comme pour le processus de drainage, les profils de saturation, la production d'effluents et la différence de pression sont suivis continuellement. Les saturations sont mesurées par atténuation γ dans la matrice et estimées à partir de la visualisation directe dans les vacuoles.

Ces mécanismes de drainage et d'imbibition forcés sont répétés sur les différents types de grès, à la fois sur les milieux homogènes et les milieux modèles vacuolaires. Les milieux "grès gris", "grès rouge tacheté" et "grès rouge" homogènes sont respectivement notés E1, E3 et E5 et les milieux vacuolaires correspondants sont respectivement notés E2, E4 et E6 (Figure 2.6). Un cycle de drainage/imbibition avec $\Delta\rho \neq 0$ est réalisé sur le couple de milieux E3/E4 et sur le milieu vacuolaire E2 : l'étude diphasique sur le milieu E1 n'a pas pu être réalisée pour des raisons techniques. On réalise également un cycle de drainage/imbibition avec $\Delta\rho = 0$ sur le couple de milieux E5/E6.

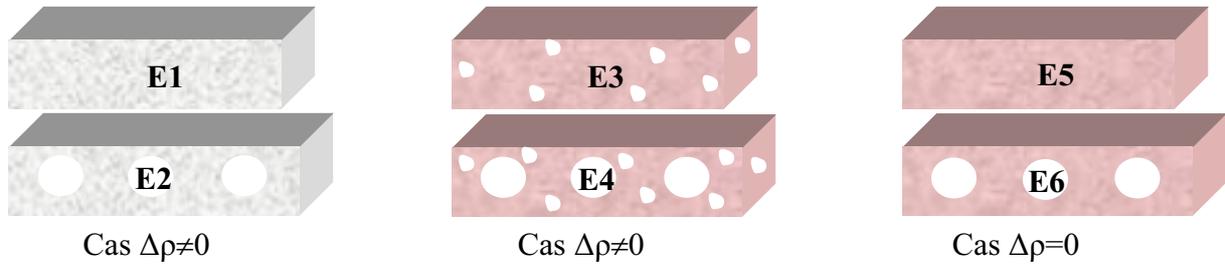


Figure 2.6. Différents couples de milieux utilisés selon les cas $\Delta\rho\neq 0$ et $\Delta\rho=0$.

Les débits fixés au niveau de la pompe d'injection ne sont généralement pas ceux obtenus en réalité. Pour éviter toute erreur d'interprétation, il est nécessaire de recalculer ces débits à partir des volumes de fluides produits lors de l'étape monophasique avant la percée. Les différents débits fixés et réels sont reportés dans le tableau 2.3.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Q drainage fixés (cc/h)	Non réalisé	15	30	30	30	25
Q drainage réels (cc/h)	Non réalisé	14,3	29,2	29,5	30	22,3
Q imbibition fixés (cc/h)	Non réalisé	10	6	6	6	6
Q imbibition réels (cc/h)	Non réalisé	9,8	5,8	5,75	6	6

Tableau 2.3. Récapitulatif des valeurs des débits imposés dans les différentes expériences.

2.2 Résultats expérimentaux et discussions

Un premier paragraphe rapporte, sans rentrer dans les détails, quelques résultats obtenus en expériences monophasiques (miniperméamètre/dispersion) sur le couple de milieux E5/E6. Des études au miniperméamètre ont confirmé que les barreaux peuvent être considérés comme homogènes, les résultats de mesures de perméabilités locales au gaz, sur un même barreau, étant généralement du même ordre de grandeur. Cette hypothèse est appuyée par des expériences de dispersion d'un traceur dans les milieux sans vacuoles. Une même étude réalisée sur les milieux vacuolaires a montré l'impact des vacuoles sur les courbes de dispersion.

Les expériences de drainage et d'imbibition sont décrites en détails dans les deux paragraphes qui suivent. Le premier concerne une étude effectuée avec un couple de fluides de masses volumiques différentes, $\Delta\rho\neq 0$, et le second concerne une étude effectuée avec un

couple de fluides de mêmes masses volumiques, $\Delta\rho=0$. Les effets de gravité et de viscosité sont mis en évidence.

2.2.1 Miniperméamètre et dispersion d'un traceur sur les milieux E5 et E6

L'étude se limite au couple de milieux E5 homogène et E6 vacuolaire. Des résultats identiques sont obtenus avec les autres milieux.

Miniperméamètre

Les perméabilités locales du milieu poreux sont mesurées à l'aide d'un miniperméamètre (Marie, 1999) fonctionnant en régime permanent. Cette étude locale permet d'apprécier l'homogénéité du milieu. Cet appareil, réalisé au laboratoire, (Figure 2.7) est composé d'un débitmètre, d'un capteur de pression et d'un vérin pour assurer un bon contact entre la buse et le bloc poreux.



Hypothèses appliquées :

- Milieux homogènes
- Gaz supposé parfait
- Ecoulement de type Darcy

Figure 2.7. Miniperméamètre et hypothèses.

La mesure au miniperméamètre consiste à injecter un gaz (azote) sur les surfaces latérales des blocs par l'intermédiaire d'une buse de dimensions connues. Le débit est fixé et la pression au niveau de la buse est mesurée. La perméabilité est déterminée en appliquant la loi de Darcy pour un fluide compressible (Goggin et al., 1988) :

$$k = \frac{Q_1 \mu P_{01}}{d_1 G_0 (d_{2D})^2 \frac{P_{01}^2 - P_0^2}{2}} \quad (2.8)$$

où d_1 est le diamètre interne de la buse, d_2 le diamètre externe, d_{2D} est le diamètre externe d_2 adimensionné par d_1 , Q_1 le débit d'injection, P_{01} la pression au niveau de la buse, P_0 la pression atmosphérique, μ la viscosité de l'azote et enfin G_0 un facteur de forme, défini à l'aide d'un abaque.

Cette technique adaptée à des échantillons cylindriques, est tout de même valable pour notre milieu parallélépipédique. Une démarche adimensionnelle permet d'avancer que notre milieu peut être supposé semi-infini dans les directions d'injection. Cette hypothèse permet de remonter au facteur de forme G_0 . Les calculs des perméabilités locales surfaciques sont alors effectués sur deux faces orthogonales pour vérifier l'isotropie du milieu considéré.

Les résultats montrent que les écarts de mesure entre les différents points locaux sur une même face sont faibles. Il existe tout de même un écart entre les deux faces orthogonales révélant l'existence d'une anisotropie de perméabilité (Figure 2.8).

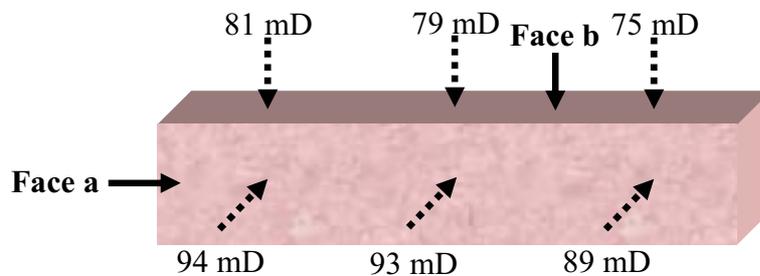


Figure 2.8. Perméabilités obtenues au miniperméamètre sur le grès rouge.

Il faut indiquer ici que cette légère anisotropie n'a pas de conséquence sur les expériences réalisées dans la mesure où elles sont essentiellement 2D. Par la suite, les barreaux de grès sont supposés homogènes et isotropes.

Etude de la dispersion d'un traceur

Des expériences de dispersion miscible sont menées de manière routinière au laboratoire pour évaluer l'homogénéité des milieux poreux utilisés. Il n'est pas question ici de

détailler l'influence des hétérogénéités sur la dispersion d'un traceur en milieux poreux, le lecteur intéressé se référera à la thèse de C. Dauba (Dauba, 1999) qui a étudié en détails ce type d'expérience.

L'expérience consiste à injecter un traceur à débit constant dans un milieu poreux saturé d'eau. Les fluides miscibles choisis sont des saumures de concentrations en sel différentes. Une pompe d'injection est placée à la face entrée du milieu et un densimètre (type Anton Paar) avec acquisition automatique des données est connecté à la sortie afin de suivre en continu l'évolution de la masse volumique de l'effluent, donc de la concentration en sel.

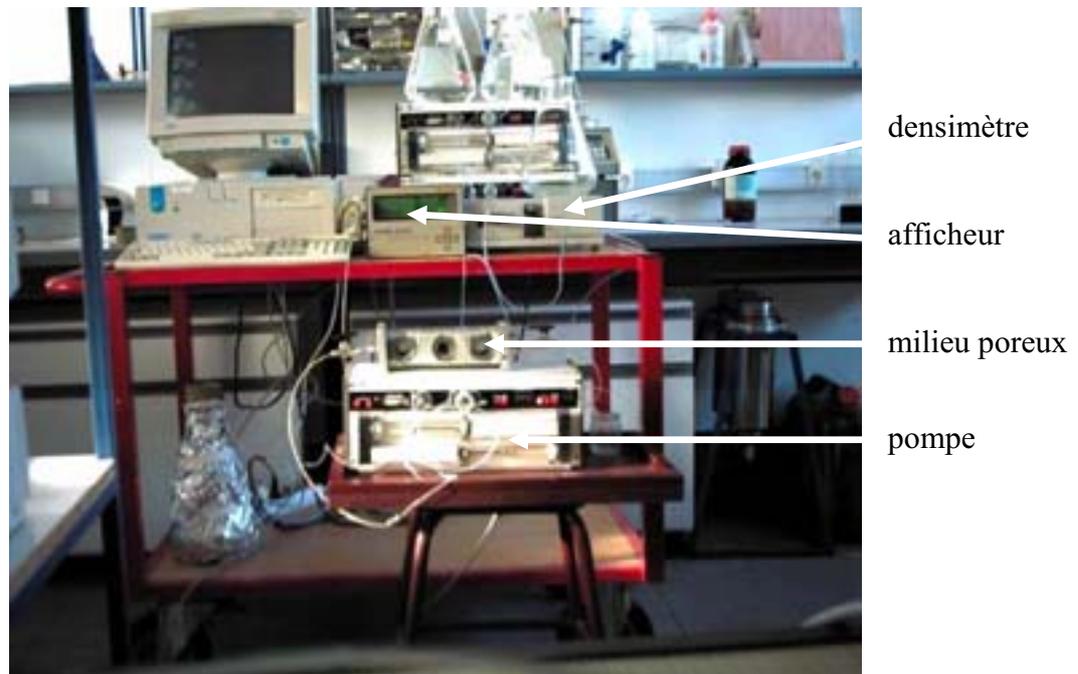


Figure 2.9. Montage pour l'étude de la dispersion.

Le débit d'injection est choisi tel que les effets de diffusion soient prépondérants devant les effets de convection, soit un nombre de Péclet inférieur à 1 :

$$Pe = \frac{Vd_p}{D} \ll 1 \quad (2.9)$$

où V est la vitesse d'injection ($V=Q/(A.\varepsilon)$), d_p une dimension caractéristique (diamètre de particule déterminé à partir de la relation de Kozeny-Carman) et D le coefficient de diffusion moléculaire ($10^{-9}m^2/s$).

Dans l'exemple qui suit, une saumure de masse volumique $\rho_s=1040 \text{ kg.m}^{-3}$ ($C=60 \text{ g/l}$ de KI) initialement présente dans les deux types de milieux (homogène/vacuolaire) est déplacée par une saumure de masse volumique $\rho_i=1010 \text{ kg.m}^{-3}$ ($C=15 \text{ g/l}$ de KI) dont le débit imposé est $Q=20 \text{ cc/h}$. La correspondance en terme de nombre de Péclet est $Pe=0,38$ pour le milieu homogène E5. L'évolution de la concentration en sel du fluide en sortie est mesurée en fonction du nombre de volumes de pores injecté. Les courbes d'élution pour les milieux E5 et E6 sont représentées sur la figure 2.10.

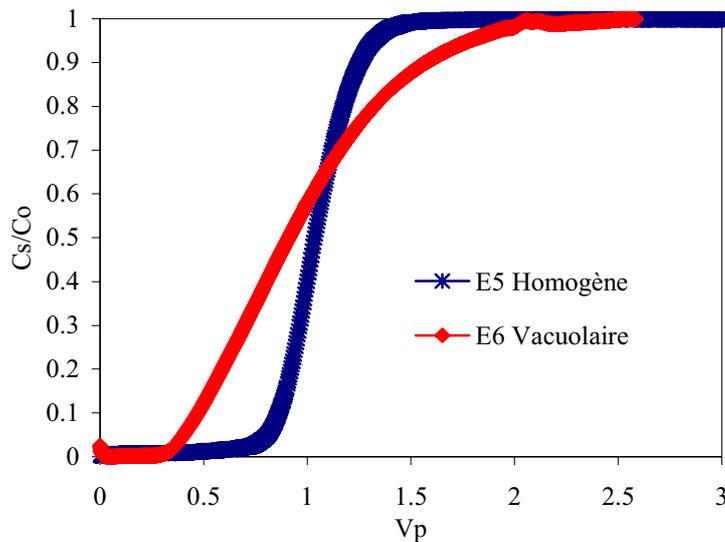


Figure 2.10. Courbes d'élution des milieux E5 homogène et E6 vacuolaire.

C_s correspond à la différence entre la concentration maximale ρ_s du fluide présent initialement dans le milieu et l'évolution de la concentration en sortie notée ρ , et C_o à la différence entre la concentration maximale ρ_s et la concentration minimale ρ_i du fluide injecté. La courbe E5 homogène montre que l'hypothèse d'homogénéité du milieu E5 est acceptable : la courbe de pente quasi nulle est quasi symétrique avec, pour 1 VP injecté, $C_s/C_o \sim 0,5$. Quant à la courbe rouge, elle montre l'impact des vacuoles sur l'écoulement dans le milieu vacuolaire E6. En effet, la courbe E6 obtenue est dissymétrique avec une percée précoce et une queue de production, typique d'un milieu hétérogène (Dauba, 1999 ; Moctezuma-Berthier, 1999). On retrouve, par ailleurs, les mêmes types de courbes avec les autres couples de milieux E1/E2 et E3/E4.

2.2.2 Ecoulements diphasiques ($\Delta\rho \neq 0$)

Nous présentons dans ce paragraphe des expériences de déplacements diphasiques effectuées à l'aide de fluides présentant un contraste de masse volumique non nul (huile Marcol et saumure). Des drainages et des imbibitions forcés ont été effectués sur des couples de milieux poreux (homogène/vacuolaire) comme cela est décrit dans le paragraphe précédent.

N.B. : toutes les données expérimentales obtenues sur les différents milieux homogènes sont déterminantes dans la suite de notre travail : elles nous permettront en effet de faire un comparatif entre les comportements des milieux homogène et hétérogène associés et donnent également des informations sur les caractéristiques intrinsèques de la partie matrice du milieu vacuolaire. Ces résultats sont d'autant plus importants qu'ils permettront de déterminer des jeux de perméabilités relatives et de pressions capillaires par identification.

La procédure expérimentale suivie est celle décrite en 2.1.3 à l'exception du milieu homogène E1 pour lequel seules les propriétés monophasiques ont été mesurées.

2.2.2.1 Milieu homogène E1

Bien que nous n'ayons pas de résultats en écoulement diphasique, les propriétés intrinsèques telles que la porosité et la perméabilité absolue à la saumure sont déterminées. Elles sont importantes pour la partie numérique du chapitre 3 qui suivra.

La porosité n'est déterminée que par pesée. Connaissant le volume total V_t du milieu, la masse de l'échantillon sec puis saturé en saumure (1010 kg/m^3), on obtient le volume de pores et la porosité. Quant à la perméabilité à la saumure, elle est obtenue à partir de la loi de Darcy : des débits sont imposés et les différences de pression correspondantes sont relevées. Les différents résultats sont reportés dans le tableau 2.4 :

Volume total V_t (cc)	Volume de pores VP (cc)	Porosité ε_m	Perméabilité k_m (mD)
500	103	0,21	37

Tableau 2.4. Propriétés intrinsèques.

Une porosité de l'ordre de 20% est un résultat en bon accord avec ce que l'on rencontre dans ce type de milieu. On notera que la faible perméabilité du milieu poreux entraînera des effets capillaires importants.

2.2.2.2 Milieu vacuolaire E2

On considère que ce milieu issu du même barreau que E1 (voir Figures 2.1 et 2.6), possède les mêmes propriétés **matricielles** que E1 (hypothèse d'homogénéité des blocs poreux initiaux)

La porosité globale ε_{eq} est déterminée par pesée. Dans le tableau 2.16 qui suit, la porosité de la partie matrice ε_m obtenue par pesée sur le milieu E1 est comparée à la porosité obtenue par gammamétrie dans la partie matrice du milieu E2. Le volume de pores total (vacuoles+porosité intergranulaire) est de 175 cc.

En ce qui concerne la perméabilité globale k_{eq} du milieu vacuolaire E2, elle peut être déterminée de trois manières :

- Une estimation théorique à partir de la prise de moyenne volumique (PMV) du modèle de Darcy-Brinkman à l'échelle des vacuoles (Lasseux, 2002). On aboutit à une loi de type Darcy (chap.1, équations 1.27 et 1.28).
- Une mesure expérimentale en utilisant la loi de Darcy,
- Une estimation par composition série/parallèle d'une région matricielle, de porosité ε_m et de perméabilité k_m , et d'une région vacuolaire. Les vacuoles sont considérées comme un milieu poreux de porosité $\varepsilon_v=1$ et de forte perméabilité k_v déterminée à partir de la résolution du problème de Stokes et par identification avec la loi de Darcy (chap.1, équations 1.24 et 1.26).

	ε_m	ε_{eq}		k_m (mD)	k_{eq} (mD)
pesée	0,21	0,31	Expérience		51
Gammamétrie	0,22	0,35	Association série/parallèle + résolution du problème de Stokes	37	53

Tableau 2.5. Propriétés intrinsèques du milieu vacuolaire E2.

Les deux méthodes pour déterminer la porosité matricielle ε_m donnent des résultats sensiblement égaux. La porosité globale ε_{eq} obtenue par technique d'atténuation γ est peu

précise puisqu'elle dépend du maillage choisi (mesures pouvant s'effectuer à l'interface vacuole/matrice).

En ce qui concerne la perméabilité globale k_{eq} du milieu poreux vacuolaire E2, la méthode expérimentale en appliquant la loi de Darcy à l'échelle de la carotte et la méthode analytique utilisant un modèle Darcy/Darcy avec résolution du problème de Stokes dans les vacuoles donnent également des résultats très proches.

- **Drainage forcé primaire du milieu E2**

Les fluides utilisés dans cette expérience sont de la saumure et de l'huile Marcol 52 dont les propriétés sont données dans le tableau suivant :

	ρ en kg.m^{-3}	μ en Pa.s
Marcol 52 ESSO	831	11.10^{-3}
Saumure (40g KI)	1025	1.10^{-3}

Tableau 2.6. Propriétés des fluides utilisés.

Le fluide mouillant (saumure) saturant initialement le milieu ($S_w=1$) est déplacé par le fluide injecté non mouillant (huile Marcol). Un débit réel constant $Q_0=14,3$ cc/h est imposé. La procédure expérimentale, détaillée dans le paragraphe 2.1.3, permet d'obtenir les résultats commentés ci-dessous.

Les valeurs de saturation en eau sont mesurées aux 33 points d'un maillage $11*3$ couvrant l'échantillon poreux (voir paragraphe 2.1.3). Des moyennes de saturation sur les trois points verticaux sont calculées. L'évolution temporelle 1D des profils de saturation en eau ainsi calculés est présentée figure 2.11. L'intervalle de temps entre deux profils successifs est de 49 minutes.

Les profils obtenus sont très irréguliers et les trois minima observés mettent en évidence à la fois le positionnement des trois vacuoles mais aussi le mécanisme de remplissage des vacuoles : en fin de drainage, quand le banc γ se déplace selon l'axe Z, la position du dispositif de mesure peut se trouver dans la vacuole ou bien à l'interface matrice/vacuole. Dans ce cas, la moyenne des saturations en saumure selon cet axe est inférieure au cas où aucun point sur cet axe n'est compris dans une vacuole. En effet, les vacuoles initialement saturées en saumure se remplissent successivement en huile.

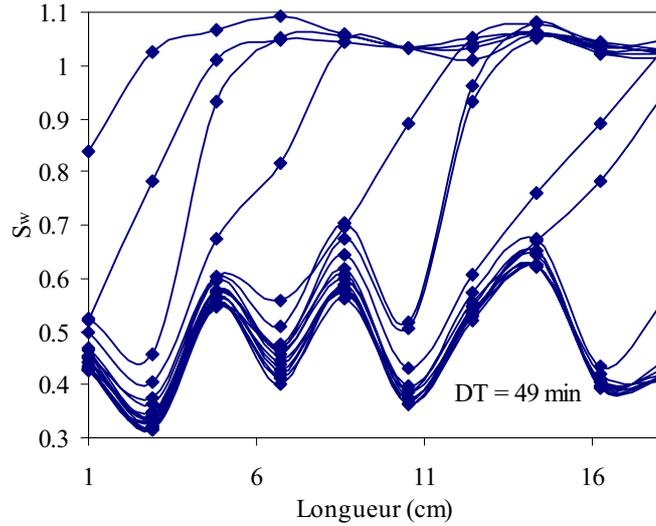


Figure 2.11. Profils de saturation du milieu E2 en drainage forcé

La courbe de fraction volumique en saumure permet de définir un temps de percée t_p correspondant à 0,7 VP d'huile injectée. La fin de production en saumure intervient après 1,53 VP d'injection d'huile.

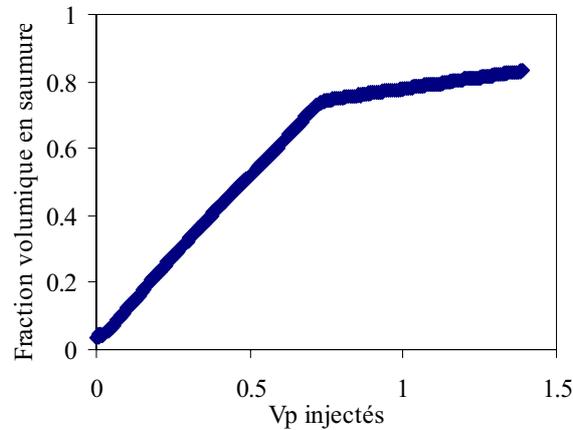


Figure 2.12. Courbe de production en saumure lors du drainage.

Durant le processus de drainage, les vacuoles se remplissent séquentiellement : chaque vacuole se sature complètement en huile ($S_o=1$) avant que le drainage ne débute dans la suivante. On observe une ségrégation gravitaire des phases dans les vacuoles comme le montre les photos présentées dans la figure 2.13.

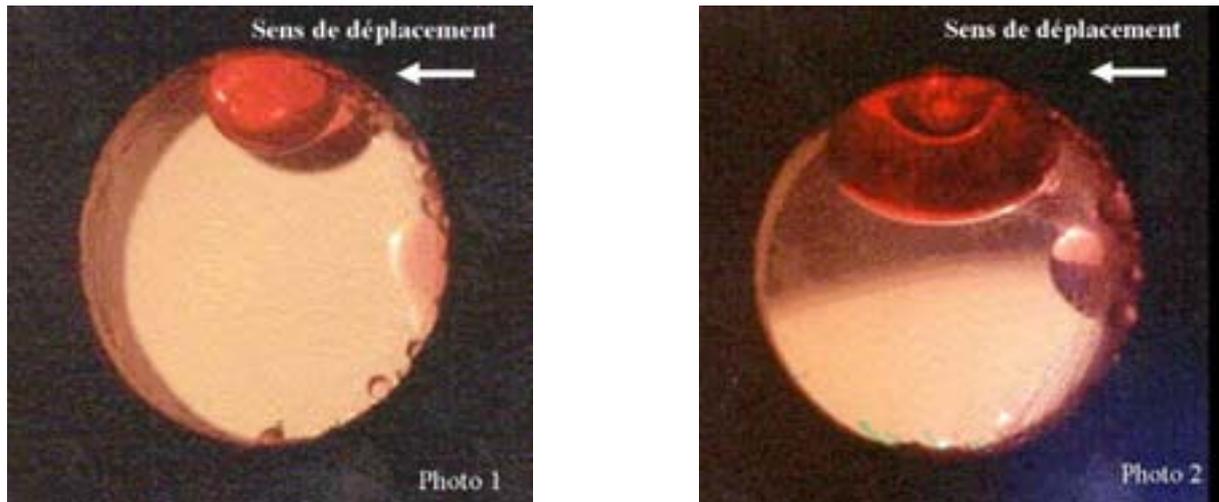


Figure 2.13. Photos de la vacuole centrale en cours de drainage.

Après avoir traversé la région matricielle en amont, l'huile pénètre dans la vacuole et le front reste quasi immobile dans la matrice. Le remplissage de la vacuole s'effectue par de petites bulles d'huile qui apparaissent au niveau de l'interface vacuole/matrice (sur la 1/2 surface latérale de la vacuole côté injection). La phase huile étant moins dense que la phase aqueuse, les bulles d'huile remontent dans la vacuole par gravité et coalescent pour former une bulle plus volumineuse. Ce phénomène de convection est bien observé sur les deux clichés. De plus, l'angle de contact saumure/huile/interface est largement inférieur à 90° confirmant une forte mouillabilité de la saumure à la roche. Les vacuoles sont entièrement saturées en huile en fin de drainage.

Le processus de remplissage séquentiel des vacuoles est également illustré par la courbe de différence de pression ΔP en fonction du temps (Figure 2.14).

Nous observons trois plateaux de pression correspondant au remplissage séquentiel des vacuoles se produisant à gradient de pression extrêmement faible. Il y a une réelle distinction des étapes d'envahissement de la matrice et des vacuoles. Quand le signal de différence de pression est croissant, le front d'huile parcourt la région matricielle. Quand l'huile rencontre une vacuole, elle l'envahit et, compte tenu de sa grande dimension, ce processus a lieu avec un gradient de pression très petit et une pression capillaire quasi nulle. Ceci explique que le drainage s'effectue préférentiellement au sein de la vacuole, le front d'huile étant alors quasi immobile dans la région matricielle. Le fluide non mouillant injecté (l'huile) parcourt préférentiellement la zone vacuolaire où la pression capillaire est la plus faible. Une fois la vacuole remplie, le front d'huile se déplace dans la région matricielle en

aval et le signal ΔP croît à nouveau. On notera que la courbe de différence de pression est une signature remarquable de la présence des vacuoles.

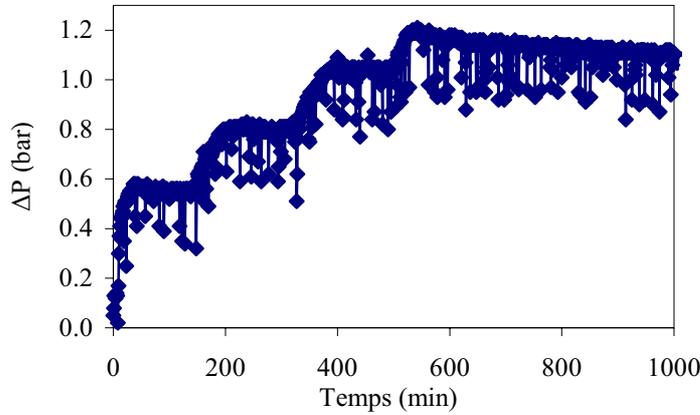


Figure 2.14. Courbe $\Delta P(t)$ lors du drainage du milieu E2.

La figure 2.14 confirme également que la percée intervient après 0,7 VP d'huile injectée (soit après 520 minutes d'injection environ). Le processus de drainage se termine après 1,53 VP d'injection d'huile. A ce stade, la saturation en saumure dans les vacuoles est nulle ($S_o=1$) et la saturation irréductible en saumure (eau piégée) dans la matrice est : $S_{wi}=0,5$. Cette saturation est calculée en effectuant la moyenne des saturations en saumure mesurées dans la matrice en fin de drainage (Figure 2.15).

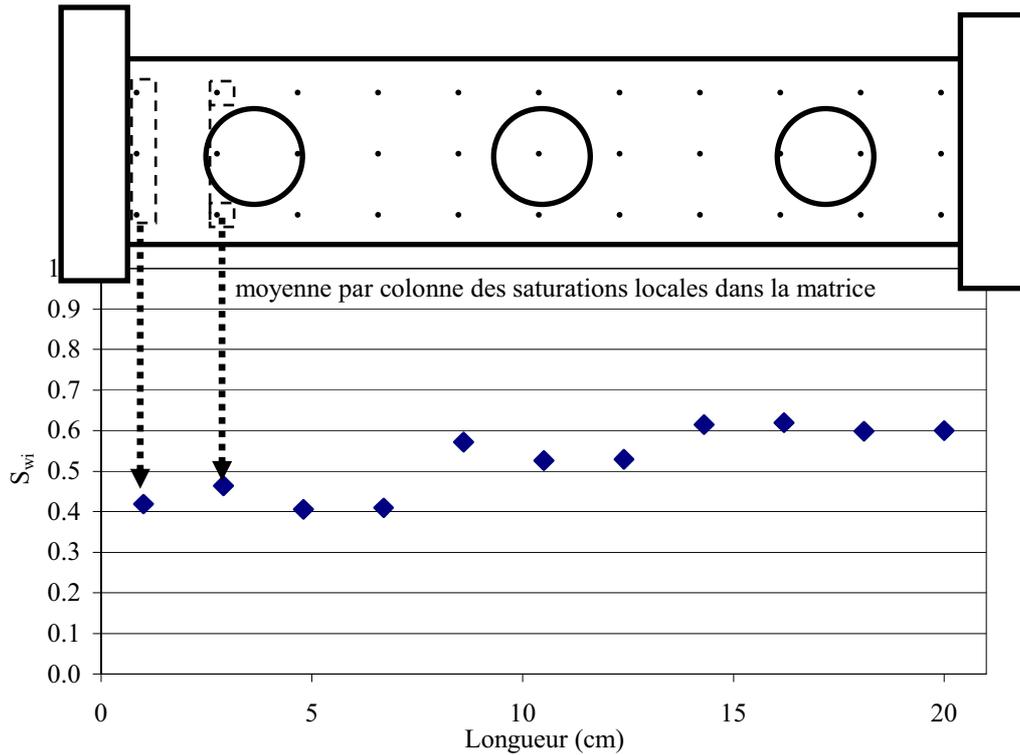


Figure 2.15. Mesure de S_{wi} moyenne dans la matrice.

Cette saturation irréductible en saumure n'est pas répartie de façon parfaitement uniforme dans la matrice, le franchissement des vacuoles jouant, semble-t-il, un rôle sur le déplacement de la saumure.

Enfin, la perméabilité à l'huile à saturation irréductible en saumure est mesurée : $k_o(S_{wi}=0,5)=33$ mD. La présence d'eau irréductible gêne peu l'écoulement de l'huile.

- **Imbibition forcée primaire du milieu E2**

Les propriétés des fluides sont strictement identiques à celles du drainage (Tableau 2.6).

Les profils de saturation en saumure sont ici plus étalés que ceux obtenus lors du drainage (Figure 2.16). Ils indiquent l'existence d'une succion capillaire importante (imbibition spontanée) dans la matrice impliquant une percée précoce.

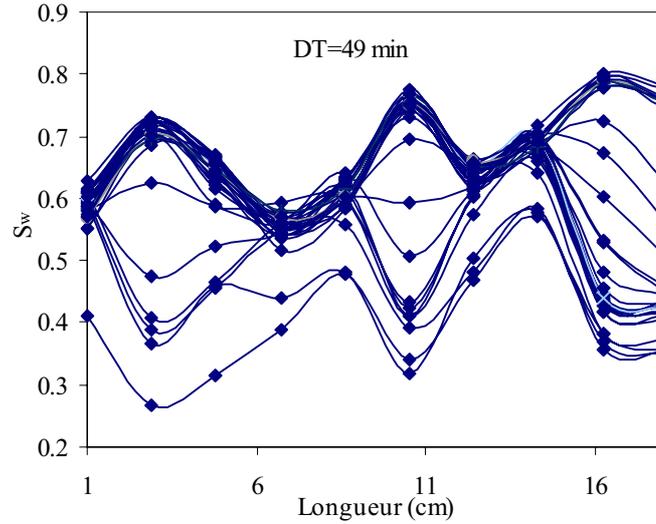


Figure 2.16. Profils de saturation du milieu E2 en imbibition forcée.

La courbe de fraction volumique en huile en fonction du volume de pores de saumure injectée confirme cette remarque (Figure 2.17). On observe une percée précoce (0,32 VP) due, sous l'effet des forces capillaires, à un déplacement principal du front dans la matrice. Ce type de comportement a déjà été décrit dans la littérature (de Zabala et al., 1995 ; Lasseux et al., 2002 ; Moctezuma-Berthier et al., 2002 ; Pairoys et al., 2003).

La percée intervient avant que la première vacuole rencontrée par le front ne soit entièrement saturée. L'imbibition se poursuit simultanément dans les vacuoles et dans la matrice, le front avançant plus rapidement dans la matrice grâce aux effets capillaires. On observe toujours une ségrégation gravitaire des phases dans les vacuoles.

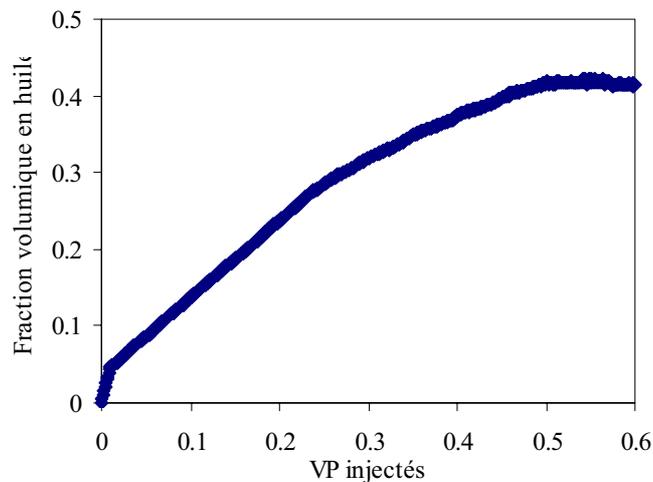


Figure 2.17. Courbe de production en huile lors de l'imbibition.

Contrairement au drainage précédemment décrit, l'imbibition des vacuoles n'est pas séquentielle : les trois vacuoles continuent leur remplissage simultanément et longtemps après la percée. En fin d'imbibition, elles sont entièrement saturées en saumure.

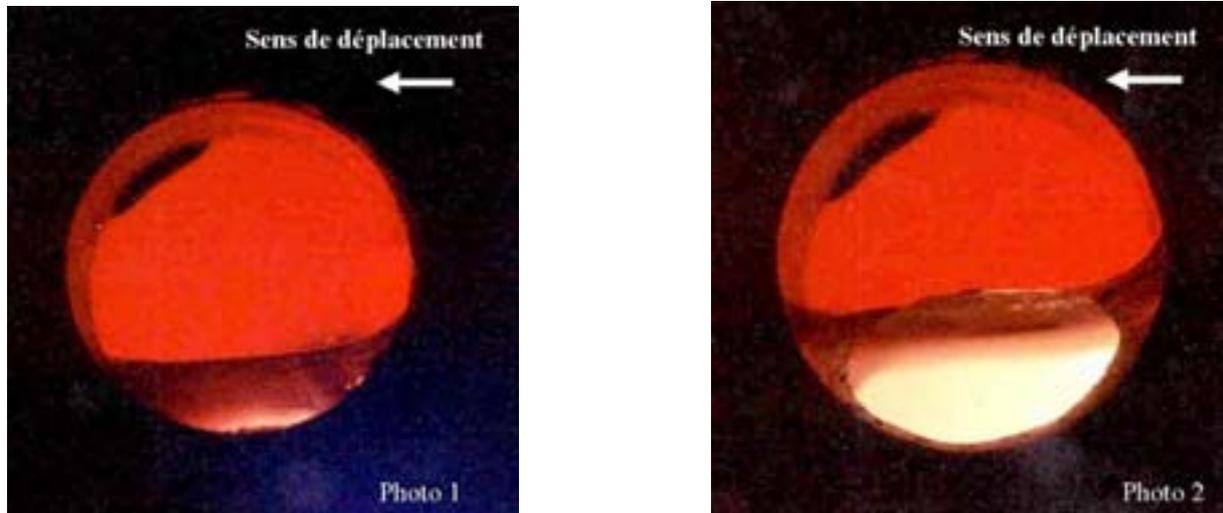


Figure 2.18. Photos de la vacuole centrale en cours d'imbibition.

Les trois plateaux clairement observés sur le signal de différence de pression durant le déplacement en drainage sont quasi inexistantes lors de l'imbibition comme le montre la figure 2.19. La saumure s'écoule dans la matrice en contournant partiellement les vacuoles. Il n'y a donc plus de stabilisation du signal de pression, ce qui ne permet pas de distinguer les étapes d'envahissement de la matrice et des vacuoles. La courbe confirme une percée après 0,32 VP de saumure injectée.

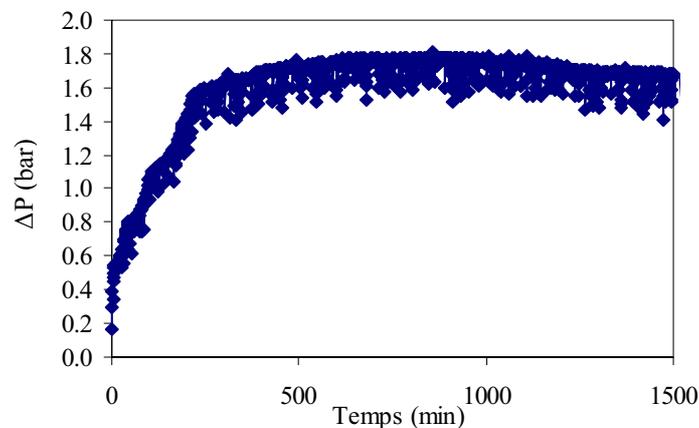


Figure 2.19. Courbe $\Delta P(t)$ en imbibition.

En fin de processus d'imbibition, la saturation résiduelle en huile dans la matrice est mesurée : $S_{or}=0,37$.

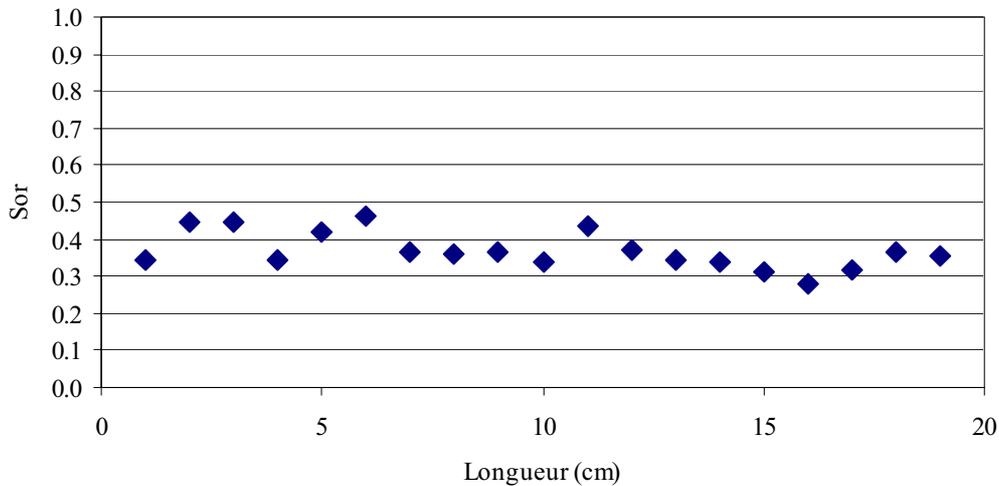


Figure 2.20. Mesure de S_{or} moyenne dans la matrice.

Les saturations moyennes en huile résiduelle prises dans la matrice poreuse ne sont, comme lors du drainage, pas répartie de façon parfaitement uniforme dans la matrice.

La perméabilité à la saumure, en présence de la saturation résiduelle en huile est mesurée : $k_w(S_{or}=0,37)=2$ mD. Contrairement au résultat obtenu en drainage en terme de perméabilité effective, la saturation résiduelle en huile S_{or} gêne fortement l'écoulement de la saumure.

2.2.2.3 Milieu homogène E3

On réitère les mêmes opérations que pour les précédents milieux pour déterminer la porosité et la perméabilité absolue. Les résultats sont reportés dans le Tableau 2.7.

Volume total V_t (cc)	Volume de pores VP (cc)	Porosité ϵ_m	Perméabilité k_m (mD)	Masse volumique ρ (kg.m^{-3})
428	100	0,23	178	1046

Tableau 2.7. Propriétés intrinsèques.

La porosité du milieu E3 est du même ordre de grandeur que celle du milieu E1. En ce qui concerne la perméabilité, elle est cinq fois plus importante que pour le milieu E1 mais reste toutefois assez faible.

- **Drainage forcé primaire du milieu E3**

Les fluides utilisés sont de la saumure et de l'huile Marcol 52 (Tableau 2.8).

	ρ en kg.m^{-3}	μ en Pa.s
Marcol 52 ESSO	840	11.10^{-3}
Saumure (40g KI)	1046	1.10^{-3}

Tableau 2.8. Propriétés des fluides utilisés.

Le milieu poreux est initialement saturé en saumure (fluide mouillant). L'huile est injectée à débit constant $Q_0=29,2$ cc/h et déplace la saumure en place. On suit ensuite la procédure expérimentale détaillée en paragraphe 2.1.3.

Les profils de saturation en saumure, obtenus par atténuation γ , confirment le caractère homogène du milieu : les profils sont différents de ceux obtenus sur le milieu E2 vacuolaire, ils sont ici réguliers, semblables. En raison du débit d'injection élevé, seuls trois profils avant la percée sont mesurés. On observe également que les valeurs des moyennes de saturations irréductibles en saumure S_{wi} en fin de drainage sont quasi constantes le long du milieu malgré un léger effet d'extrémité (Figure 2.21).

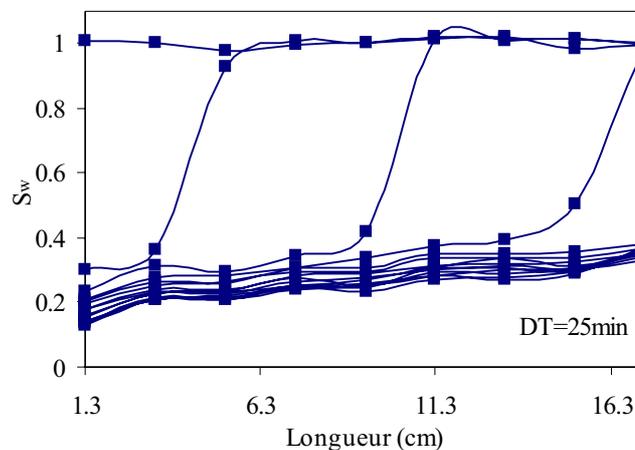


Figure 2.21. Profils de saturation du milieu E3 en drainage forcé.

La courbe de production permet d'estimer un temps de percée correspondant à 0,59 VP d'huile injectée et une fin de production diphasique après 1,67 VP injectés (Figure 2.22).

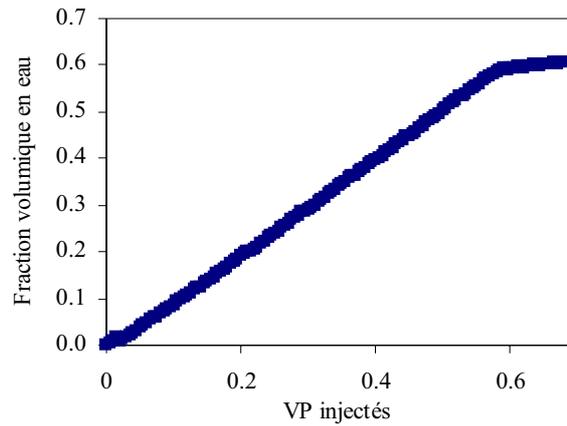


Figure 2.22. Courbe de production en saumure lors du drainage.

Le signal de pression ΔP , présenté figure 2.23 montre également une percée à $t \sim 120$ minutes (soit 0,59 VP) suivie d'une production diphasique.

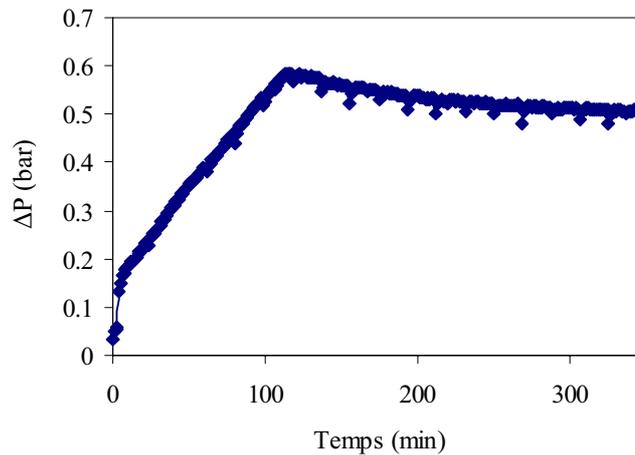


Figure 2.23. Courbe $\Delta P(t)$ en drainage.

En fin de drainage, la saturation irréductible en saumure est déterminée par atténuation γ et par bilan des volumes récupérés. Les deux méthodes donnent des résultats équivalents : $S_{wi}=0,27$. Quant à la perméabilité effective à l'huile $k_o(S_{wi})$, elle est égale à 176 mD. On retrouve, à 2 mD près, la perméabilité absolue ($k_w=178$ mD) : la présence d'eau irréductible « gêne » peu l'écoulement.

- **Imbibition forcée primaire du milieu E3**

Les fluides sont identiques à ceux utilisés pour le processus de drainage. On débute l'expérience à $S_{wi}=0,27$ en injectant de la saumure à un débit constant $Q_w=5,8$ cc/h. Les mêmes mesures que lors du drainage sont effectuées.

Les profils obtenus (Figure 2.24) sont, comme pour le drainage, réguliers mais ils sont ici plus étalés. Cet étalement est synonyme d'imbibition spontanée. En terme de nombre capillaire Ca , sa valeur en imbibition Ca_{imb} est 55 fois plus petit que le nombre capillaire en drainage Ca_{drai} , impliquant un impact plus marqué des forces capillaires dans le cas de l'imbibition ($Ca=\mu V/\sigma$). A la différence du mécanisme de drainage où la pression capillaire semble ne pas jouer un rôle prépondérant sur le déplacement des fluides, une succion capillaire est donc observée en imbibition. Elle implique une percée précoce observée sur la courbe de production en huile (Figure 2.25).

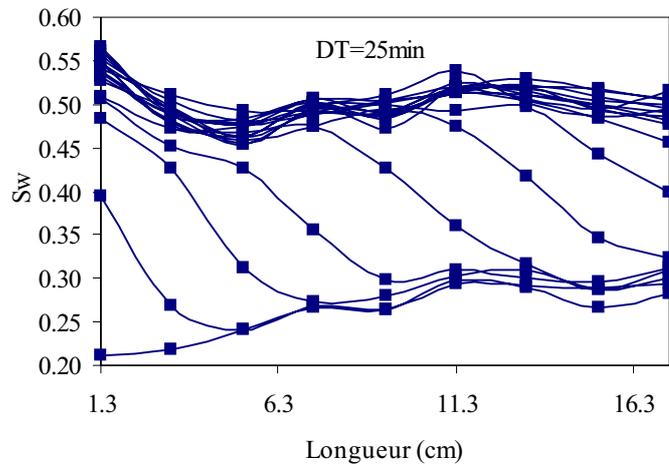


Figure 2.24. Profils de saturation du milieu E3 en imbibition forcée.

La percée intervient après 0,2 VP de saumure injectée. La production diphasique se termine quant à elle après 0,45 VP injectés (figure 2.25).

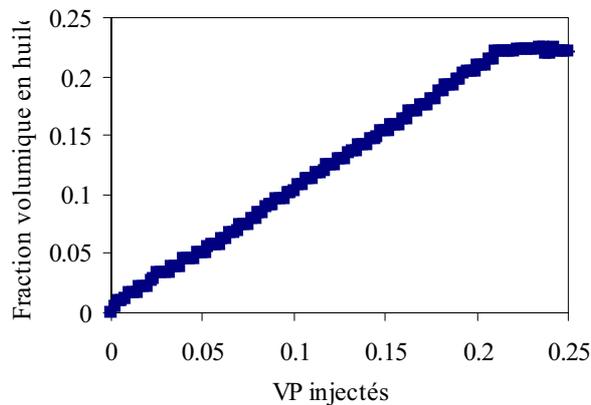


Figure 2.25. Courbe de production en huile lors de l'imbibition.

La courbe de pression présentée sur la figure 2.26 corrobore les informations apportées en terme de percée et de fin de production d'huile.

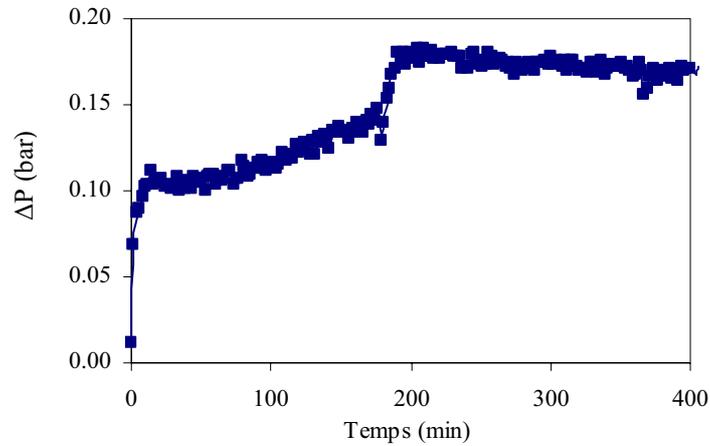


Figure 2.26. Courbe $\Delta P(t)$ en imbibition.

En fin d'imbibition, la saturation résiduelle en huile est déterminée par atténuation γ et par lecture directe des volumes récupérés dans des éprouvettes, soit : $S_{or}=0,49$. La perméabilité effective à l'huile $k_w(S_{or})$ mesurée est égale à 9 mD. La présence d'huile résiduelle « gêne » fortement l'écoulement.

2.2.2.4 Milieu vacuolaire E4

Ce milieu est issu du même barreau que le milieu E3 : il possède, à priori, les mêmes caractéristiques « matricielles » que E2.

A 1% près, la porosité matricielle ε_m du milieu E4 est égale à celle du milieu E3. Par contre, la perméabilité globale k_{eq} mesurée expérimentalement est différente de la perméabilité théorique calculée de manière analytique à partir de la perméabilité k_m de la partie matrice, obtenue sur le milieu homogène E3. Lors de l'analyse du milieu E4 au miniperméamètre, nous avons observé que le milieu E4 était moins perméable que le milieu E3. La perméabilité k_m choisie pour E4 n'est donc pas celle du milieu E3. Connaissant la perméabilité globale et en utilisant les formules d'association série/parallèle et par résolution du problème de Stokes dans les vacuoles (chap.1, équations 1.24 et 1.26), on obtient une perméabilité matricielle $k_m=136$ mD.

	ϵ_m	ϵ_g		k_m (mD)	k_{eq} (mD)
pesée	0,25	0,36	Expérience		196
Gammamétrie	0,24	0,41		Association série/parallèle + résolution du problème de Stokes	178

Tableau 2.9. Propriétés intrinsèques du milieu vacuolaire E4.

• **Drainage forcé primaire du milieu E4**

Les fluides sont strictement identiques à ceux utilisés avec le milieu homogène E3 associé (Tableau 2.8).

Un débit constant d’huile $Q_0=29,5$ cc/h est imposé sur la face d’entrée de l’échantillon initialement saturé en saumure. La même procédure expérimentale que précédemment est respectée.

On retrouve le même type de comportement que lors du drainage du milieu E2 : les profils de saturation sont irréguliers et dénotent un caractère hétérogène du milieu (Figure 2.27). Les trois minima correspondent au positionnement des vacuoles qui se remplissent séquentiellement en huile. En fin de processus, les vacuoles sont entièrement saturées d’huile.

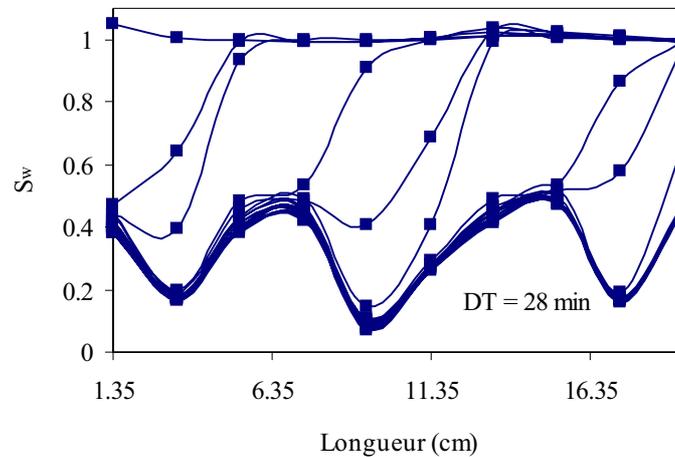


Figure 2.27. Profils de saturation du milieu E4 en drainage forcé.

La percée et la fin de production de saumure interviennent respectivement après 0,75 et 1,48 VP d’huile injectée (Figure 2.28). On retrouve les mêmes cinétiques que pour le drainage du milieu vacuolaire E2 (respectivement 0,7 et 1,53 VP) mais aussi le même processus de remplissage des vacuoles : quand l’huile pénètre dans une vacuole, le front huile/saumure reste quasi immobile dans la matrice. Le phénomène de

ségrégation/coalescence des bulles d'huile dans les vacuoles est à nouveau observé (voir photos de la Figure 2.13). En fin de drainage, les trois vacuoles sont entièrement saturées en huile.

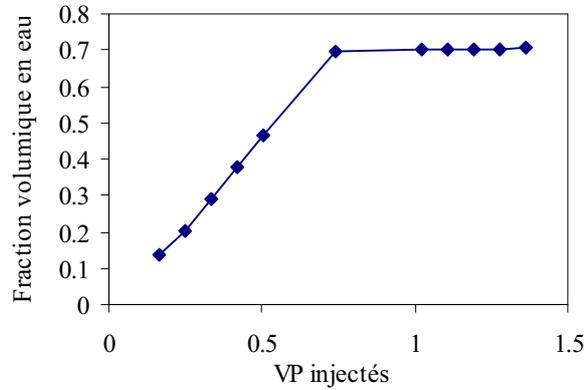


Figure 2.28. Courbe de production de saumure lors du drainage.

Les trois plateaux de pression correspondant aux remplissages successifs des vacuoles sont à nouveau observés lors du drainage.

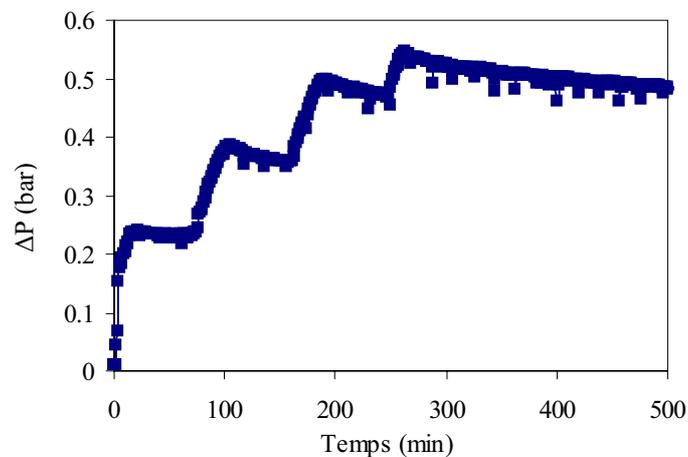


Figure 2.29. Courbe $\Delta P(t)$ en drainage.

En fin de drainage, la perméabilité effective à la saumure $k_o(S_{wi})$ obtenue est supérieure à la perméabilité absolue k_{eq} : elle est évaluée à 204 mD (alors que $k_{eq}=196$ mD).

Ceci peut être expliqué par la présence de films de saumure (fluide mouillant) tapissant les surfaces porales et permettant à l'huile de glisser dans les pores. Ce phénomène a déjà été observé et simulé dans la littérature (Danis, 1982).

Ici, la présence de la saturation irréductible en saumure S_{wi} égale à 0,45 ne gêne pas et privilégie l'écoulement de l'huile. La valeur de $S_{wi}(E4)$, saturation irréductible en saumure du milieu E4, est légèrement plus faible que $S_{wi}(E2)$, saturation irréductible en saumure du milieu E2 ($S_{wi}(E2)=0,5$). Le débit d'huile plus important lors de l'expérience sur E4 peut expliquer que $S_{wi}(E4) < S_{wi}(E2)$.

• **Imbibition forcée primaire du milieu E4**

On impose à présent un débit de saumure $Q_w=5,75$ cc/h. La saturation initiale en saumure est $S_{wi}=0,45$ dans la matrice et $S_w=0$ dans les vacuoles.

Les profils sont plus étalés que lors du drainage. Il y a imbibition spontanée due à un déplacement principal du front dans la matrice. Cette expérience a été interrompue avant la fin de production d'huile, la cinétique de production d'huile après la percée étant extrêmement lente. Nous avons alors observé que les vacuoles étaient encore partiellement saturées en huile. La succion capillaire dans la matrice prouve à nouveau l'importance du rôle de la pression capillaire P_c dans cette zone.

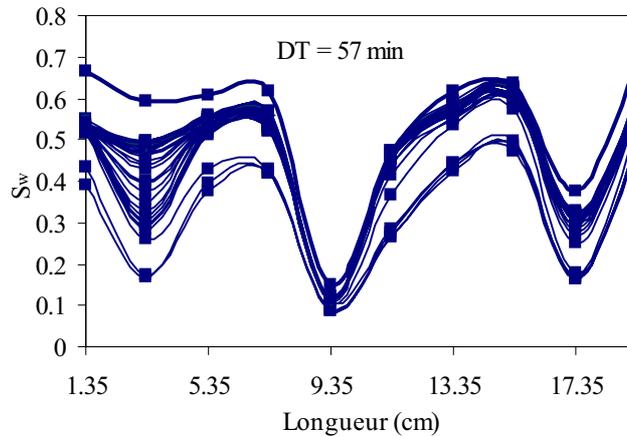


Tableau 2.30. Profils de saturation du milieu E4 en imbibition forcée.

Comme observé sur le milieu E2, la percée est précoce : elle intervient après 0,128 VP de saumure injectée (Figure 2.31). La production en huile après la percée étant très longue, nous avons choisi de stopper l'expérience en dépit d'une faible mais constante production en huile. A ce stade, nous avons constaté que la saturation dans la matrice n'évoluait plus et que l'huile produite provenait des vacuoles.

Lors du remplissage, non séquentiel, des vacuoles, la répartition des deux phases s'effectue comme pour l'imbibition du milieu E2 (Figure 2.18).

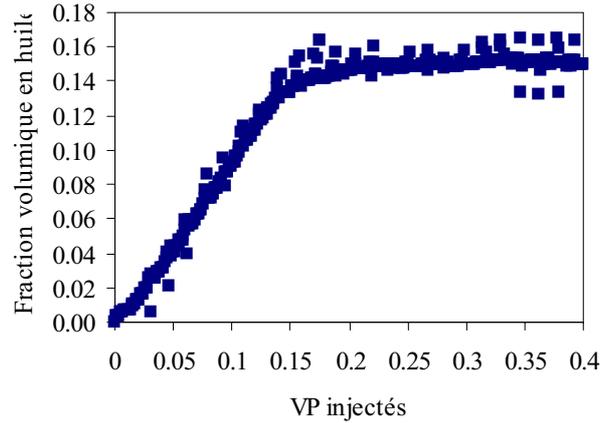


Figure 2.31. Courbe de production en huile lors de l'imbibition.

Le front se déplace dans la matrice en contournant partiellement les vacuoles. Il n'y a pas de stabilisation de la différence de pression et donc, pas de distinction possible des étapes d'envahissement des vacuoles (Figure 2.32).

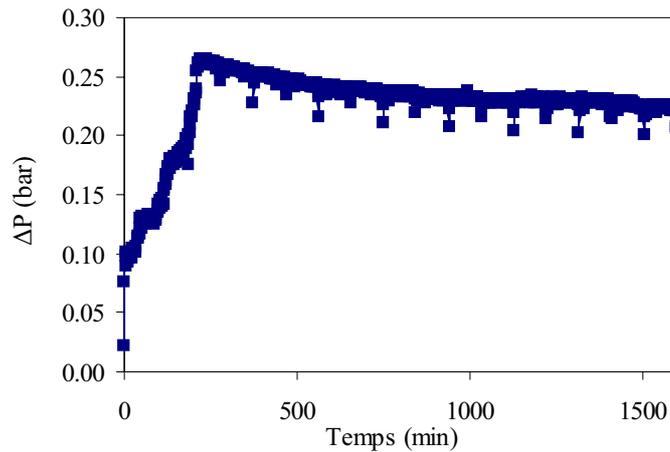


Figure 2.32. Courbe $\Delta P(t)$ lors de l'imbibition.

En fin de processus, soit après plus de 2 VP d'injection de saumure, on mesure la perméabilité effective à la saumure : $k_w(S_{or})=7,5$ mD avec S_{or} égale à 0,37. On retrouve la même valeur de S_{or} que pour le milieu E2 avec un débit de saumure pourtant plus faible. La présence d'huile résiduelle gêne considérablement l'écoulement.

2.2.3 Ecoulements diphasiques ($\Delta\rho=0$)

Dans ce paragraphe, le couple de fluides est choisi tel que leurs masses volumiques soient identiques. On utilise pour cela du dibutyl-phthalate et de l'eau dopée en iodure de potassium (KI) de façon à ce que la densité de la solution soit égale à celle du dibutyl-phthalate. L'expérience est réalisée sur le couple de milieux homogène E5 et vacuolaire E6. A la différence du chapitre précédent, seuls les profils de saturation et la différence de pression sont mesurés au cours du temps, le relevé de la masse produite n'apportant aucune indication ($\rho_o=\rho_w$).

	ρ en kg.m^{-3}	μ en Pa.s
Dibutyl-phthalate	1046	17.10^{-3}
Saumure (40g KI)	1046	1.10^{-3}

Tableau 2.10. Propriétés des fluides utilisés.

2.2.3.1 Milieu homogène E5

Les pesées et mesures γ sur le milieu sec puis saturé permettent de déterminer la porosité de l'échantillon. On note un bon accord entre les résultats. La perméabilité à la saumure est mesurée.

Volume total V_t (cc)	Volume de pores VP (cc)	Porosité ε_m	Perméabilité k_m (mD)	Masse volumique ρ (kg.m^{-3})
442	97	0,22	80	1046

Tableau 2.11. Propriétés intrinsèques.

- **Drainage forcé primaire du milieu E5**

Le milieu initialement saturé en saumure est balayé par l'huile dont le débit constant est fixé à 30 cc/h. On applique la procédure expérimentale du paragraphe 2.1.3.

Les profils de saturation présentés dans la figure 2.33 sont caractéristiques d'un écoulement dans un milieu homogène. Cette homogénéité a été mise en évidence lors des mesures locales de perméabilités (minipermeamètre) et de l'expérience de dispersion d'un

traceur. En fin de drainage, la saturation irréductible en saumure déterminée par gammamétrie et par bilan des volumes récupérés est $S_{wi}=0,24$.

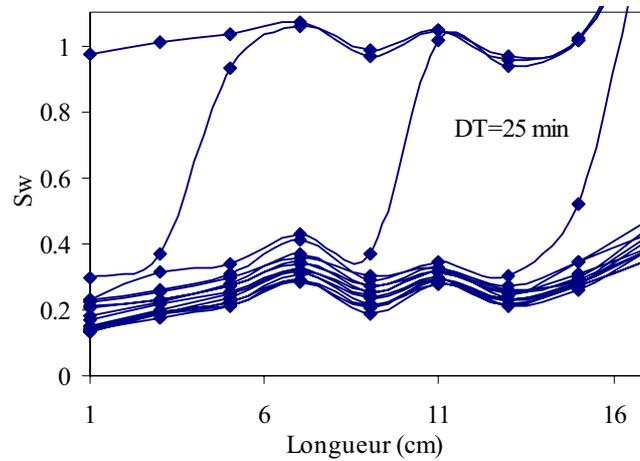


Figure 2.33. Profils de saturation du milieu E5 lors du drainage forcé.

Le signal de différence de pression ΔP (Figure 2.34) donne des indications en termes de temps de percée et de fin de production de saumure. Le début de production d'huile et la fin de production de saumure interviennent respectivement après 0,56 et 1,85 VP d'huile injectée.

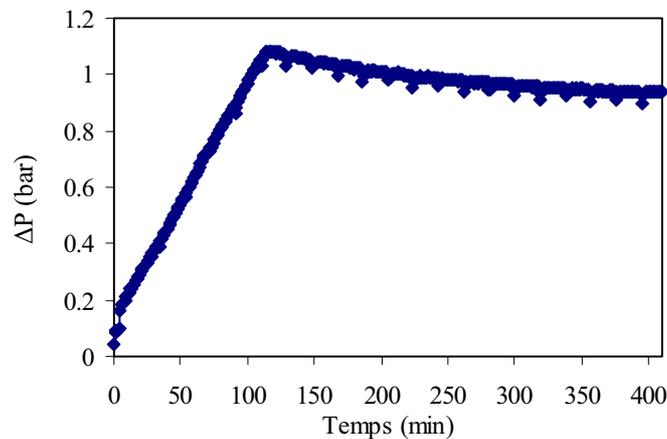


Figure 2.34. Courbe $\Delta P(t)$ lors du drainage.

En fin de drainage, on obtient une perméabilité effective à l'huile à saturation irréductible en saumure $k_o(S_{wi})$ égale à 111 mD, soit un résultat supérieur à la valeur de la perméabilité absolue à la saumure ($k_m=80$ mD) : comme pour le cas $\Delta\rho\neq 0$, il est probable que la saumure piégée tapisse la surface des pores et permette à l'huile de s'écouler avec un effet

de lubrification. Cette saturation irréductible en phase mouillante favorise l'écoulement de la phase non mouillante.

- **Imbibition forcée primaire du milieu E5**

L'expérience est réalisée avec la présence de saumure piégée ($S_{wi}=0,24$). Le débit constant de saumure est fixé à 6 cc/h.

L'étalement des profils observé en imbibition sur le milieu E3 avec $\Delta\rho\neq 0$ est moins visible lors de cette expérience. En fin d'imbibition, le pourcentage de dibutyl-phthalate piégé est de 48% (soit $S_{or}=0,48$) et la perméabilité effective à la saumure $k_w(S_{or})$ est évalué à 3,6 mD. Comme pour le cas $\Delta\rho\neq 0$, la présence de phase non mouillante piégée gêne fortement l'écoulement de la phase mouillante.

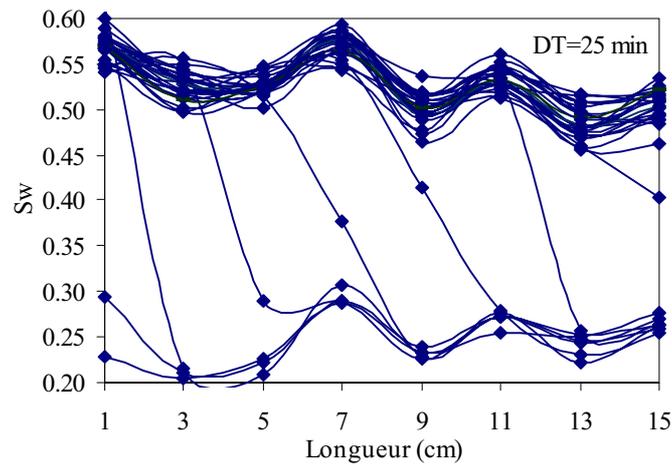


Figure 2.35. Profils de saturation du milieu E5 lors de l'imbibition forcée.

Le signal de différence de pression (Figure 2.36) indique que la percée intervient après 0,23 VP injectés et il n'y a plus production d'huile après 0,6 VP injectés.

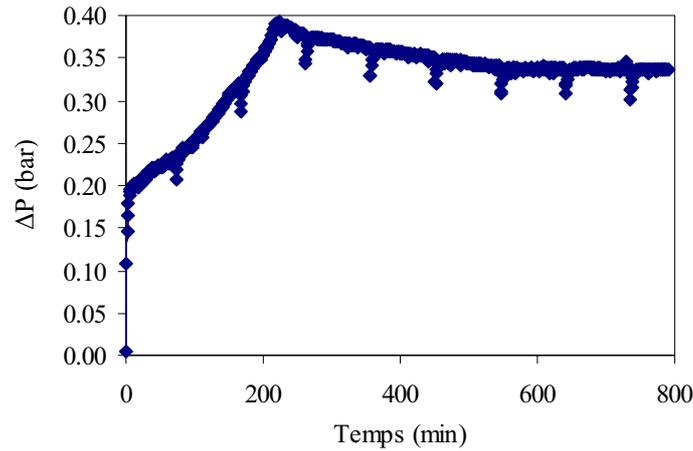


Figure 2.36. Courbe $\Delta P(t)$ en imbibition.

2.2.3.2 Milieu vacuolaire E6

Une étude préliminaire (gammamétrie+pesée) permet de déterminer les caractéristiques intrinsèques du milieu : elles sont reportées dans le tableau 2.12.

On remarque que la perméabilité globale k_{eq} estimée analytiquement est très proche de celle obtenue expérimentalement. Cela indique que le choix d'une perméabilité matricielle pour le milieu E6 égale à celle du milieu homogène E5 est correct. Effectivement, les faibles écarts entre les perméabilités locales mesurées avec le minipermeamètre ont montré que le barreau de grès, dont sont issus les milieux E5 et E6, était homogène.

Volume total V_t (cc)	Volume de pores VP (cc)	Porosité ϵ_m	Perméabilité k_m (mD)	Masse volumique ρ (kg.m^{-3})
525	164	0,2	80	1046

	k_m (mD)	k_{eq} (mD)
Expérience		118
Association série/parallèle + résolution du problème de Stokes	80	115

Tableau 2.12. Propriétés intrinsèques du milieu vacuolaire E6.

- **Drainage forcé primaire du milieu E6**

Le dibutyl-phthalate est injecté à débit constant $Q_0=22,3$ cc/h, le milieu étant saturé initialement en saumure. La percée en huile est obtenue après 0,82 VP d'huile injectée.

Les profils de saturation sont irréguliers : on repère aisément à partir des minima du profil de fin de drainage, les emplacements des vacuoles (Figure 2.37). A la fin du processus, les trois vacuoles sont complètement saturées en huile.

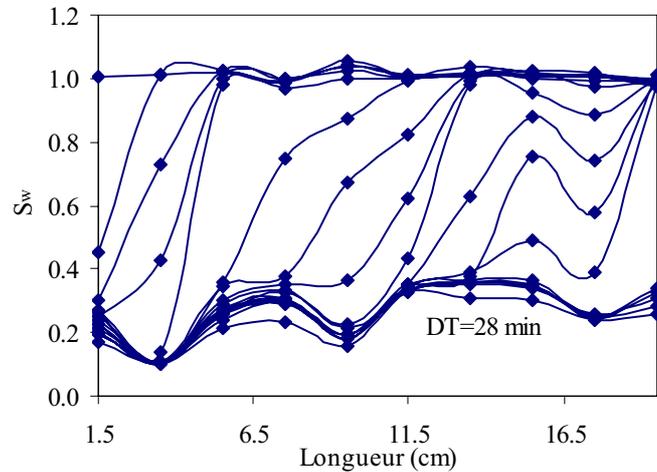


Figure 2.37. Profils de saturation du milieu E6 lors du drainage forcé.

En l'absence de contraste de densité entre les deux phases liquides, de petites gouttes d'huile apparaissent en divers endroits de l'interface vacuole/matrice et demeurent en suspension dans le volume d'eau initial. A la différence des drainages des milieux E2 et E4, on n'observe pas de remplissage séquentiel des vacuoles : le drainage d'une vacuole commence avant que la précédente soit complètement saturée.

Le signal de différence de pression en processus de drainage est quelque peu différent de ceux obtenus pour les milieux E2 et E4 (Figure 2.38). Les trois plateaux correspondant à un déplacement diphasique dans une région de pression capillaire nulle, sont toujours observés mais toutefois moins marqués.

Même si les étapes d'envahissement des vacuoles sont visibles sur la courbe $\Delta P(t)$, le front d'huile progresse dans la matrice simultanément avec le remplissage des vacuoles. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la mouillabilité de la roche à l'eau est plus faible en présence du dibutyl-phthalate.

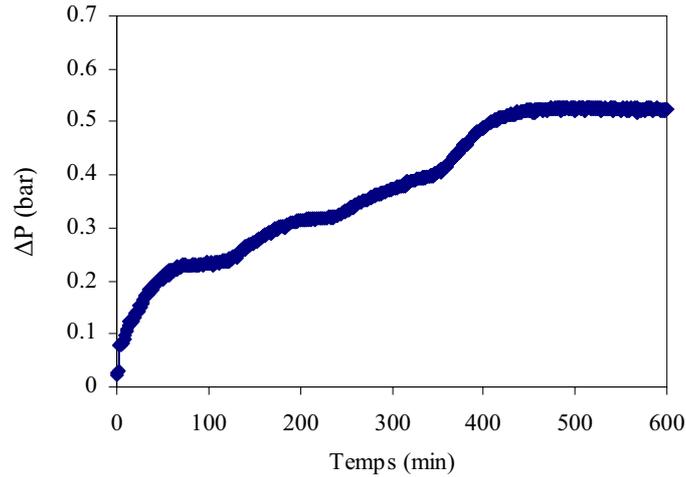


Figure 2.38. Courbe $\Delta P(t)$ lors du drainage.

En fin de drainage, les mesures de saturation indiquent que la saturation irréductible en saumure S_{wi} est égale à 0,3 dans la matrice et nulle dans les trois vacuoles. La perméabilité effective à l'huile $k_o(S_{wi})$ est mesurée, égale à 205 mD. Comme pour le milieu homogène associé, la présence de S_{wi} favorise l'écoulement d'huile.

- **Imbibition forcée primaire du milieu E6**

La saumure est injectée dans le milieu à un débit constant $Q_w=6$ cc/h. La saturation initiale en saumure est $S_{wi}=0,3$ et les vacuoles sont entièrement saturées en huile. La percée précoce apparaît après 0,28 VP de saumure injectée.

Le comportement observé sur E6 est différent de celui observé sur le milieu homogène E5 associé. L'influence des vacuoles sur le mécanisme d'imbibition est ici aussi bien mise en évidence.

Les profils de saturation (Figure 2.39) sont très étalés témoignant une nouvelle fois d'un effet capillaire très marqué durant l'imbibition dans la matrice. Le déplacement de l'huile dans les vacuoles est un processus extrêmement lent : l'envahissement intégral des vacuoles est quasi complet après plus de 4 VP de saumure injectée.

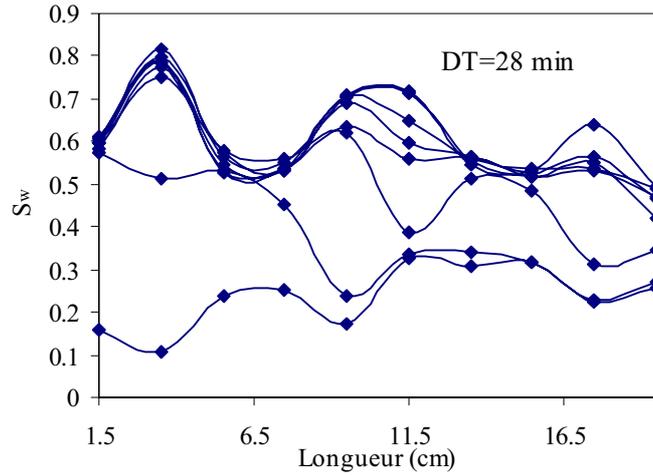


Figure 2.39. Profils de saturation du milieu E6 lors de l'imbibition forcée.

Le signal de différence de pression est très particulier. Comme pour les imbibitions des milieux E2 et E4 ($\Delta\rho \neq 0$), on ne différencie pas les étapes d'envahissement de la matrice ou des vacuoles. Par contre, on note un plateau unique correspondant à un déplacement d'huile à pression quasi constante (et donc pression capillaire quasi nulle) dans les vacuoles. Pendant l'envahissement non séquentiel des vacuoles, le front de saumure se déplace également dans la matrice. L'augmentation de ΔP effectif au déplacement dans la partie matricielle n'est pas observée sur le signal.

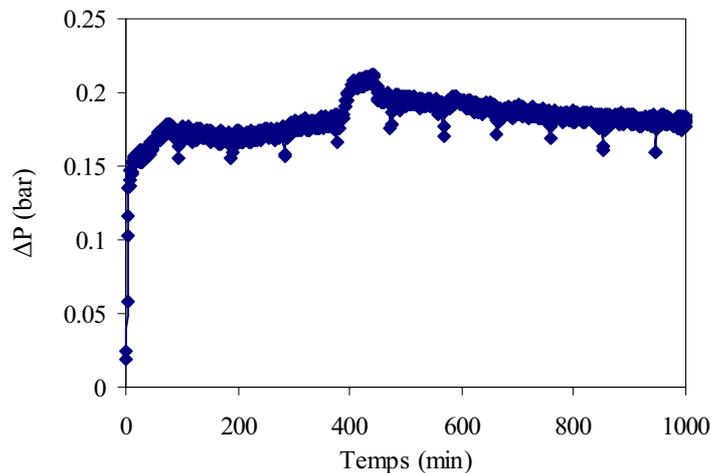


Figure 2.40. Courbe $\Delta P(t)$ lors de l'imbibition.

La valeur finale de la saturation en saumure est égale à 0,56 dans la matrice et quasiment 1 dans les vacuoles. La perméabilité effective à la saumure $k_w(S_{or})$ est évaluée à 8 mD, la présence de S_{or} gênant considérablement l'écoulement de la phase mouillante.

Comme attendu, la ségrégation des phases ne se produit pas en raison de l'absence de force de gravité entre les deux fluides.

A l'issue de ce chapitre expérimental, plusieurs remarques sont à noter :

1. Pour les cas $\Delta\rho\neq 0$, une ségrégation des phases, conséquence directe d'un contraste de densité entre les deux fluides, est directement visualisée dans les vacuoles. Pour le cas $\Delta\rho=0$, il n'y a pas de séparation gravitaire des deux phases.
2. Dans chacun des cas, les cinétiques de production, l'évolution des saturations et les signaux de différence de pression ont des comportements différents durant un drainage ou une imbibition. Durant le drainage, les vacuoles se saturent en huile séquentiellement tandis que le front huile/saumure reste immobile dans la matrice. Ce résultat est moins marqué lors du drainage avec $\Delta\rho=0$. Durant l'imbibition, une percée précoce est observée avec une production d'huile très longue. La saturation en saumure des vacuoles n'est pas séquentielle et s'effectue simultanément avec l'envahissement de la matrice. Ces différentes observations confirment un rôle des perméabilités relatives dans la région vacuolaire, surtout pour le processus de drainage alors qu'en imbibition, la pression capillaire dans la matrice est un paramètre très important.
3. En drainage, la saturation irréductible en fluide mouillant gêne peu voire favorise l'écoulement du fluide non mouillant. Par contre, en imbibition, la saturation résiduelle en fluide non mouillant gêne fortement l'écoulement du fluide mouillant.

Chapitre 3

3 Etude numérique des écoulements eau/huile en milieu poreux vacuolaire

Dans le génie pétrolier, les outils de simulation numérique sont utilisés à des fins de prévisions des scénarios optimaux de production spécifiques à chaque réservoir. Cette analyse est nécessaire afin de prévoir le comportement global du réservoir soumis à différentes stratégies d'exploitation et d'envisager de nouveaux forages.

Le simulateur ATHOS, utilisé par la suite, permet de résoudre des systèmes d'équations décrivant des écoulements multiphasiques multiconstituants en milieu poreux hétérogène. Dans ce chapitre, des simulations numériques d'écoulement diphasique de deux fluides incompressibles sont réalisées sur des milieux homogènes et vacuolaires. Pour ce faire, nous utilisons l'option « labo » du simulateur ATHOS qui permet d'imposer des conditions aux limites correspondant à celles des expériences effectuées en laboratoire. L'objectif de cette étude numérique est de simuler des déplacements diphasiques eau/huile dans les milieux poreux vacuolaires modèles et d'effectuer une comparaison directe entre les résultats numériques et expérimentaux, en terme de différence de pression, de production et de profils de saturation.

Le modèle utilisé lors des simulations est du type Darcy généralisé hétérogène, décrit dans le chapitre 1. Deux couples de k_r/P_c doivent être introduits dans les fichiers de données : un premier pour la région matricielle et un second pour la région vacuolaire dans laquelle on suppose que l'écoulement diphasique peut être décrit par un modèle de Darcy généralisé.

Pour la région matricielle, un couple de perméabilités relatives $k_r(S_w)$ et de pression capillaire $P_c(S_w)$ est identifié par calage numérique avec les résultats expérimentaux obtenus sur les milieux homogènes. Ce couple est ensuite utilisé comme caractéristiques pétrophysiques pour la zone de matrice des milieux vacuolaires associés.

Pour la région vacuolaire, on assimile les vacuoles à un milieu poreux de forte perméabilité k_v , de pression capillaire nulle et de porosité ε_v égale à 1. Ainsi notre échantillon est considéré comme un milieu poreux hétérogène composé de deux régions de caractéristiques différentes. La perméabilité intrinsèque k_v de la région vacuolaire est déterminée à partir d'une méthode développée au laboratoire (Lasseux et al., 2002).

Plusieurs formes de perméabilités relatives, pour la région vacuolaire, sont testées :

- Un premier test avec des k_r tels que la mobilité des deux fluides soit toujours maximale excepté aux saturations limites,
- Un deuxième avec des k_r tels que la mobilité des deux fluides soit toujours nulle excepté aux saturations limites,
- Un troisième avec des k_r linéaires, dits « en croix ».

L'objectif de ces choix a priori est de mettre en évidence que le choix de perméabilités relatives dans les vacuoles ne peut pas être arbitraire. On verra également qu'une identification soigneuse de la pression capillaire dans la matrice est nécessaire.

3.1 Description de l'outil de simulation ATHOS

Cet outil de simulation a été développé par l'IFP et BEICIP-FRANLAB pour l'industrie pétrolière et nous a été fourni dans le cadre d'une collaboration avec l'IFP. Il permet de simuler des écoulements multiphasiques en 3D à partir d'un modèle d'écoulement de fluides basé sur la loi de Darcy généralisée. Il utilise une architecture classique composée :

- d'un module d'initialisation et d'acquisition des données, le pré-processeur,
- d'un module de simulation, le processeur,
- d'un module d'extraction des résultats, le post-processeur.

La particularité d'ATHOS est de posséder une option permettant d'effectuer des simulations dans les conditions d'expériences de laboratoire : l'option « labo » n'apporte pas de changement par rapport à une simulation classique de réservoir mais elle permet :

- une prise en compte des effets d'extrémité dus à une discontinuité de la pression capillaire en sortie ($P_c=0$ sur la face sortie de l'échantillon),
- une simplification des données de production (notion de frontières au lieu de puits). Dans nos simulations, la frontière entrée fonctionne à débit imposé et la frontière sortie fonctionne à pression imposée (réf. : document ATHOS).

Pour le maillage, nous utilisons une grille régulière dans un repère cartésien (axe Z vertical descendant orienté selon la gravité) comme indiqué sur la figure 3.1. Pour les simulations, nous avons utilisé un maillage tel que le nombre de mailles selon chaque axe soit $NX=18$, $NY=1$, $NZ=1$ dans le cas homogène 1D et $NX=48$, $NY=1$, $NZ=12$ dans le cas

vacuolaire 2D. Ce choix est motivé par le rapport de forme du domaine de calcul tout en conservant des temps de calculs raisonnables.

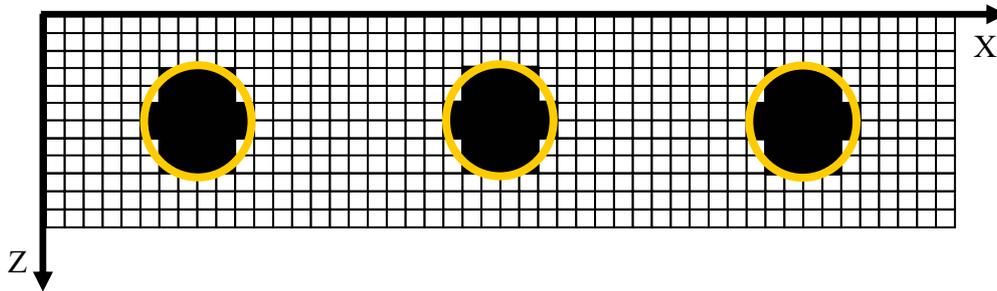


Figure 3.1. Maillage du modèle vacuolaire.

Dans le cas de notre étude, nous nous limitons à des écoulements diphasiques eau/huile en 1D pour la simulation des expériences effectuées sur les milieux homogènes et 2D pour la simulation des expériences effectuées sur les milieux vacuolaires. En ce qui concerne la définition des données thermodynamiques PVT, un modèle « Black-Oil » est adopté. Les simulations s'effectuent à température constante avec deux phases, l'une mouillante, l'autre non mouillante, qui sont choisies immiscibles et incompressibles.

On introduit les données géométriques, thermodynamiques, pétrophysiques, les données en terme de k_r/P_c et de points limites ainsi que les données frontières. On définit ensuite un schéma de résolution : notre choix s'est porté sur le schéma IMPEM qui correspond à une résolution implicite sur la pression et un traitement explicite sur les autres inconnues. La non linéarité du problème est résolue dans une boucle itérative en utilisant une méthode de Newton. A chaque itération de Newton, le système linéaire est résolu par une méthode itérative de gradient conjugué préconditionné par une décomposition LU incomplète.

3.2 Identification 1D des propriétés des milieux homogènes (k_r/P_c)

Dans ce paragraphe, nous résumons la procédure et donnons les résultats de l'identification des courbes de k_r et de P_c qui permettent de représenter au mieux (on parlera de calage) les données expérimentales obtenues sur les milieux homogènes E3 et E5, présentées dans le chapitre précédent. Nous optons pour une représentation de k_r et de P_c de type Corey (Corey, 1994) :

$$k_o = k_o(S_{wi})(1 - S^*)^{\alpha_o} \quad (3.1)$$

$$k_w = k_w (S_{or}) S^{*\alpha_w} \quad (3.2)$$

$$P_c = P_c (S_{wi}) S^\alpha \quad (3.3)$$

Dans les équations (3.1) et (3.2), S^* représente la saturation réduite définie par :

$$S^* = \frac{S - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \quad (3.4)$$

Pour le milieu E3, utilisé lors de l'expérience à contraste non nul de masse volumique ($\Delta\rho \neq 0$), les calages sont effectués sur les courbes de différence de pression, de production et sur les profils de saturation.

Pour le milieu E5 utilisé pour l'expérience où $\Delta\rho = 0$, les calages sont effectués à partir du signal de différence de pression et des profils de saturation (le signal de production n'apportant aucune information).

Les calages des données numériques et expérimentales sont effectués par comparaison directe des courbes obtenues. L'opération de calage est effectuée manuellement par simulations directes successives.

Les propriétés pétrophysiques des milieux homogènes E3, E5, mesurées expérimentalement ainsi que les coefficients de Corey déduits des calages numériques présentés dans le paragraphe 3.2.2 sont reportés dans le tableau 3.1. Les coefficients α_o , α_w , α , et $P_c(S_{wi})$ sont estimés par des simulations directes en utilisant les équations 3.1, 3.2 et 3.3 pour représenter les perméabilités relatives et la pression capillaire. En ce qui concerne le milieu E1, les expériences diphasiques n'ayant pas pu être réalisées, aucun calage numérique n'est effectué. Cependant, une extrapolation des résultats obtenus sur le milieu E2 et sur le couple de milieux E5/E6 nous a permis néanmoins d'estimer les valeurs des k_r et de P_c qui seront ensuite utilisées dans la région matrice du milieu vacuolaire E2 associé à E1.

L'ensemble des données pétrophysiques, expérimentales et simulées, des différents milieux homogènes est reporté dans le tableau 3.1 :

E3 ($\Delta\rho\neq 0$)	α_o	α_w	$k_o(S_{wi})$	$k_w(S_{or})$	$P_c(S_{wi})$	α	S_{wi}	S_{or}
drainage	10	2,5	176	178	6000	-0,5	0,27	
imbibition	1,5	1,1	176	9	2000	-0,5		0,49
E5 ($\Delta\rho=0$)								
drainage	1,3	2,9	111	80	1500	-1,5	0,24	
imbibition	1,3	2,9	111	3,6	800	-1,5		0,48
E1 ($\Delta\rho\neq 0$)								
drainage	1,3	2,9	24	37	2200	-1,5	0,50	
imbibition	1,3	2,9	24	1,5	1175	-1,5		0,37

Tableau 3.1. Propriétés pétrophysiques et coefficients de Corey des milieux homogènes pour les simulations 1D homogènes.

Les données répertoriées dans le tableau 3.1 permettent de réaliser des calages manuels entre simulations et expériences pour les milieux E3 et E5. Les courbes de k_r/P_c obtenues par simulations seront représentées par la suite. Pour le milieu E1, on ne propose que les courbes de k_r et de P_c obtenues par extrapolation.

- **Milieu homogène E3 (cas $\Delta\rho\neq 0$)**

On réalise des calages simulations/expériences des profils de saturation, des courbes de ΔP et de récupération (Figure 3.2). Sur la figure 3.2, nous avons représenté les comparaisons entre profils de saturation, fractions volumiques d'eau produite et perte de charge obtenues expérimentalement et numériquement à l'issue du calage. Le résultat de ce calage a conduit aux valeurs reportées dans le tableau 3.1, les courbes correspondantes $k_r(S)$ et $P_c(S)$ étant répertoriées sur la figure 3.3.

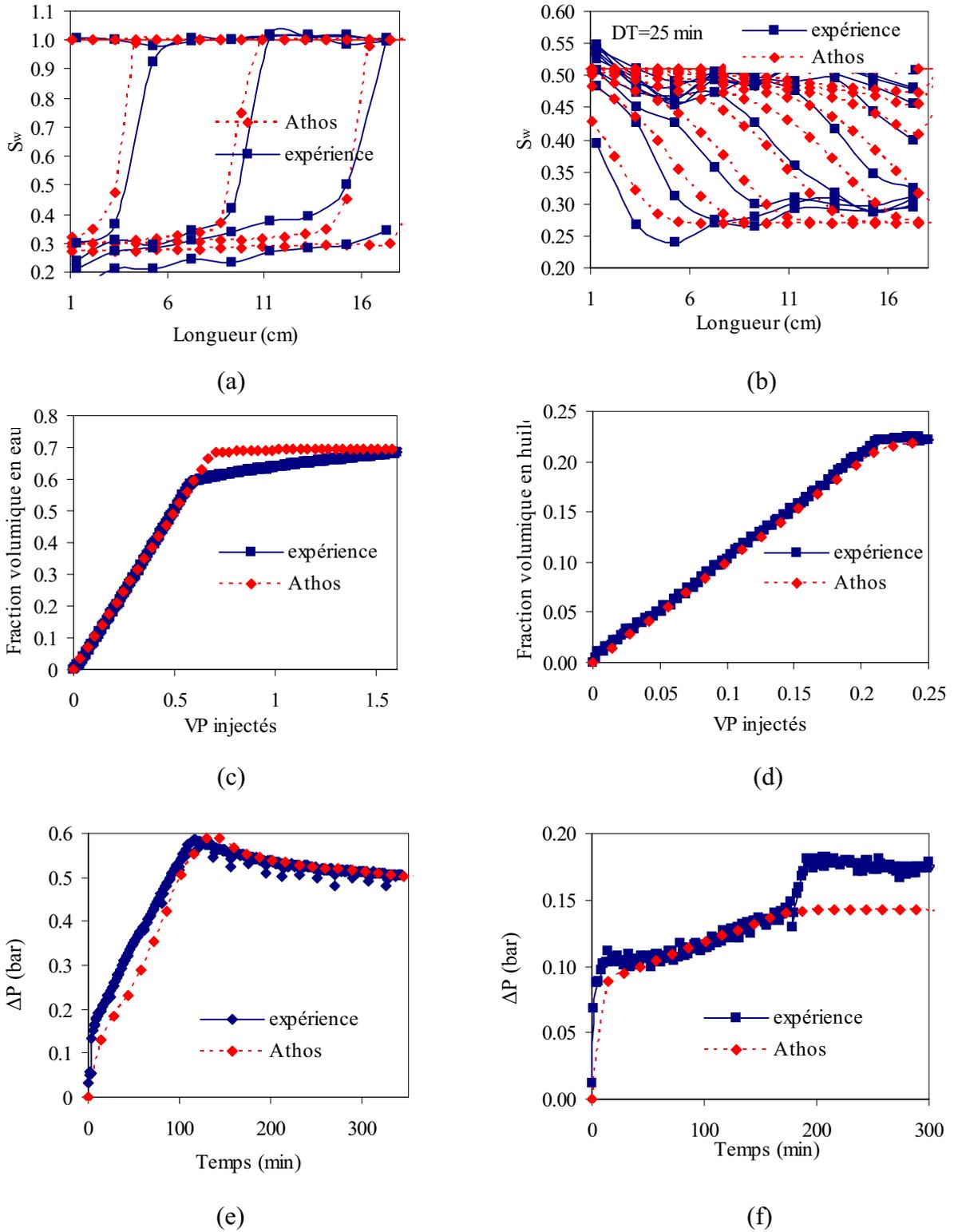


Figure 3.2. Ajustement par calage numérique des profils de saturation (a) et (b), des récupérations (c) et (d) et des signaux de différence de pression (e) et (f) respectivement pour le drainage et l'imbibition du milieu E3.

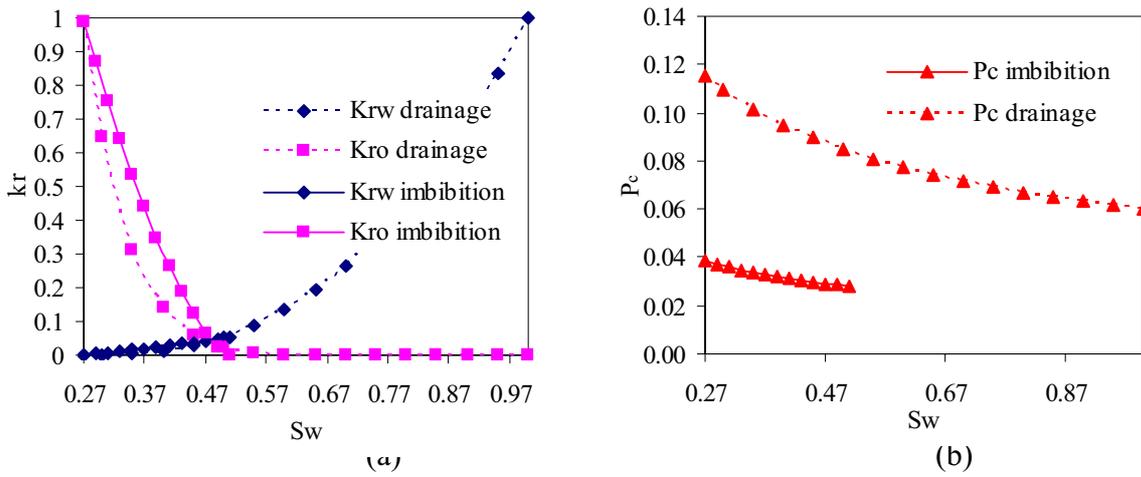
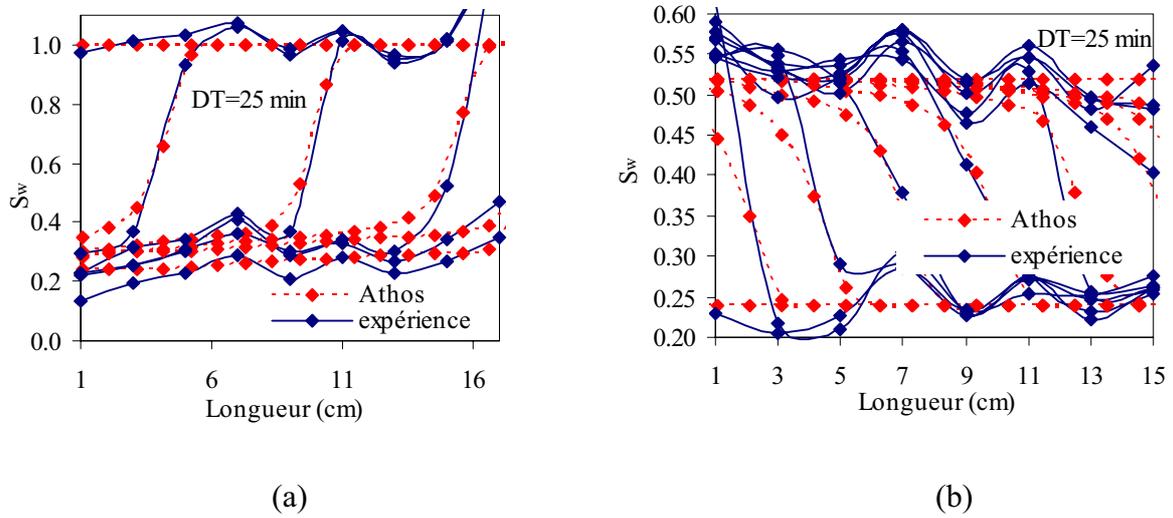


Figure 3.3. Courbes de k_r (a) et de P_c (b) pour le milieu E3.

• Milieu E5 (cas $\Delta\rho=0$)

On réalise cette fois-ci un calage des expériences sur les profils de saturation, et sur l'évolution de ΔP (Figure 3.4).



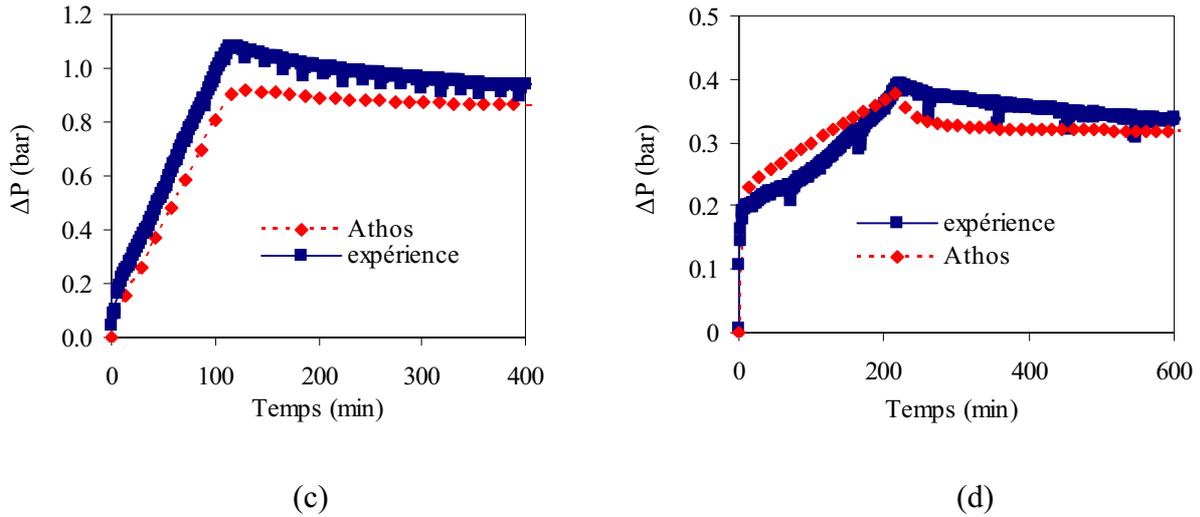


Figure 3.4. Ajustement par calage numérique des profils de saturation (a) et (b) et des signaux de différence de pression (c) et (d) respectivement pour le drainage et l'imbibition du milieu E5.

Les courbes de k_r/P_c qui correspondent aux résultats de simulation de la figure 3.4 sont représentées sur la figure 3.5.

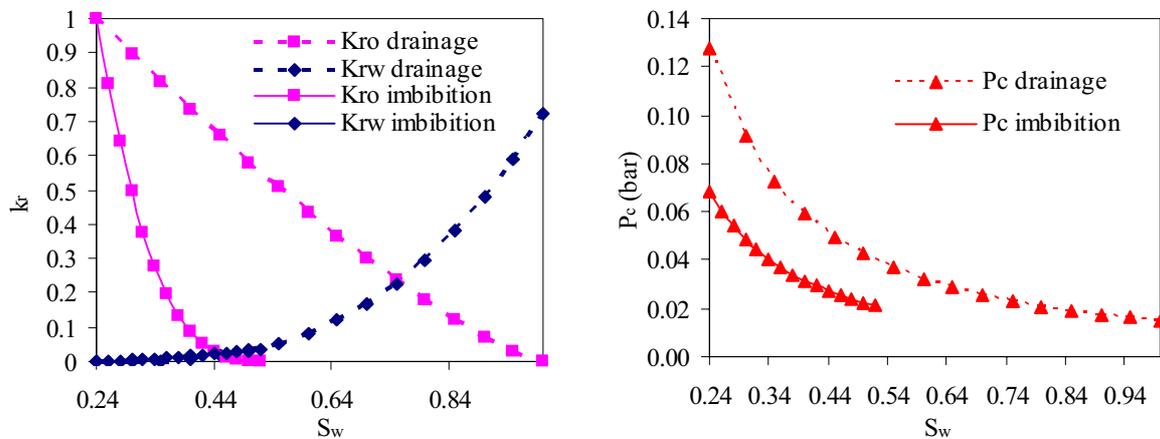


Figure 3.5. Courbes de k_r/P_c pour le milieu E5.

Des tests de sensibilité aux différents paramètres α_w , α_o , α et $P_c(S_{wi})$ sur le milieu E3 (voir annexe 1), ont montré que :

- lors du drainage, les différentes caractéristiques simulées sont plus sensibles aux variations des perméabilités relatives. Avec de faibles variations de α_w et α_o , les signaux de différence de pression et de récupération notamment varient clairement,

➤ lors de l'imbibition, les différentes caractéristiques simulées sont cette fois-ci plus sensibles aux variations de la pression capillaire (et donc aux coefficients $P_c(S_{wi})$ et α). Ces coefficients influencent notamment l'étalement des profils de saturation et le signal de différence de pression.

- **Milieu E1 (cas $\Delta\rho\neq 0$)**

Les propriétés monophasiques du milieu E1 sont indiquées dans le tableau 2.4 du chapitre 2. Les données S_{wi} , S_{or} , $k_o(S_{wi})$ et $k_w(S_{or})$ qui n'ont pas été obtenues expérimentalement sont déterminées par extrapolation. En terme de saturation irréductible et résiduelle, nous avons repris les mêmes saturations finales obtenues sur le milieu vacuolaire associé E2. Pour les perméabilités effectives, on conserve les mêmes rapports entre les deux perméabilités effectives et absolues. Ce choix est motivé par la remarque suivante. Pour les couples de milieux E5 et E6, le ratio $k_o(S_{wi})/k_m$ est quasi constant et vaut 1,4 pour le milieu homogène et 1,7 pour le milieu vacuolaire après drainage.

Pour le milieu vacuolaire E2, ce rapport vaut 0,65. En supposant que ce rapport est conservé pour le milieu E1, et compte tenu que $k_m=37$ mD, on trouve $k_o(S_{wi})=24$ mD.

La remarque précédente est également valable pour le ratio $k_w(S_{or})/k_m$ après imbibition, de sorte que $k_w(S_{or})$ pour le milieu E1 peut être estimée de la même manière. L'ensemble des résultats pour le milieu E1 est rassemblé dans le tableau 3.1.

A ce stade, il reste à estimer les exposants de Corey pour les perméabilités relatives. En l'absence d'autres éléments de choix, nous avons conservé les exposants identifiés pour le milieu E5.

Faute de calage direct pour estimer la pression capillaire, nous avons utilisé la procédure suivante. Nous appuyons notre raisonnement sur l'hypothèse que la pression capillaire obéit à une forme proposée par Leverett (1940), i.e. :

$$P_c = \frac{\sigma \cos \theta_e}{\sqrt{\frac{k}{\varepsilon}}} J(M,S) \quad (3.4)$$

relation dans laquelle σ est la tension interfaciale, θ_e l'angle de contact (à l'équilibre, mesuré dans la phase mouillante pour le système considéré) et $J(M,S)$ la fonction de Leverett qui rend compte de la dépendance de P_c vis-à-vis de la morphologie et de la connectivité des pores ainsi que de la saturation (Bear, 1988). Nous supposons ici, compte tenu de la nature identique des roches utilisées entre les différents échantillons que σ , θ_e , et $J(M,S)$ sont des

invariants pour tous nos milieux. L'exposant de Corey est donc par conséquent considéré ici comme un invariant entre E1 et E5. On peut donc en déduire :

$$P_{c_{E1}} \sqrt{\frac{k_{E1}}{\varepsilon_{E1}}} = P_{c_{E5}} \sqrt{\frac{k_{E5}}{\varepsilon_{E5}}} \quad (3.5)$$

ou, compte tenu que les porosités des deux milieux sont équivalentes :

$$P_{c_{E1}} (S_{wi}) = P_{c_{E5}} (S_{wi}) \sqrt{\frac{k_{E5}}{k_{E1}}} \quad (3.6)$$

Les propriétés pétrophysiques k_r et P_c estimées sur E1 sont rassemblées dans le tableau 3.1. Les fonctions $k_r(S_w)$ et $P_c(S_w)$ en drainage et en imbibition sont représentées sur la figure 3.6.

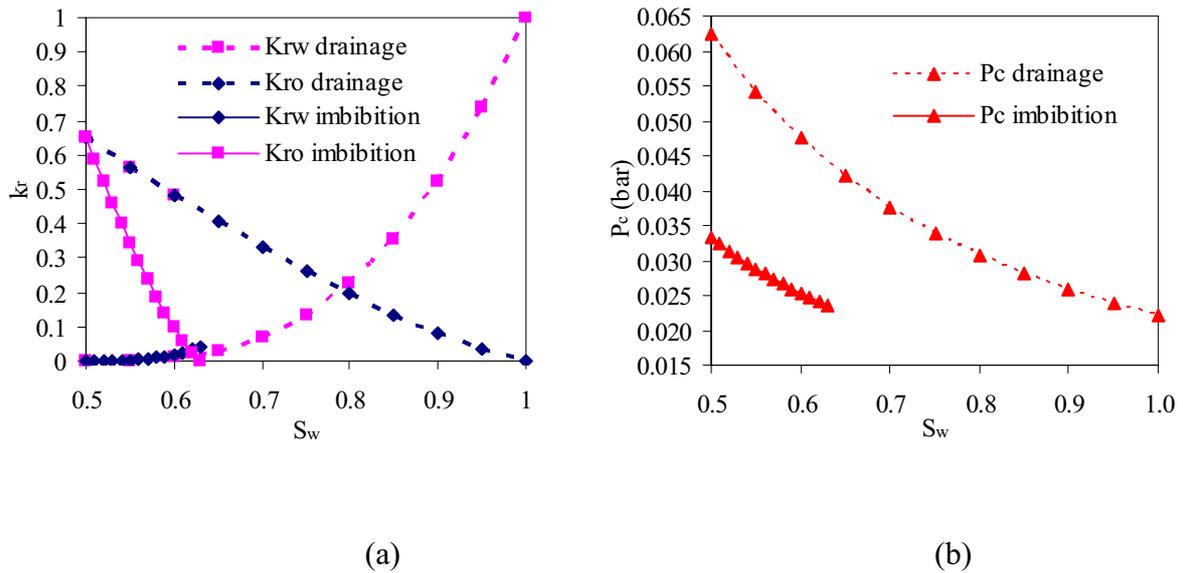


Figure 3.6. Courbes de k_r (a) et de P_c (b) pour le milieu E1.

Des ajustements par calage numérique ont permis d'identifier les propriétés des milieux homogènes en terme de k_r et de P_c . Comme les milieux vacuolaires associés à chacun des milieux homogènes sont issus du même barreau et que l'on considère que les régions matricielles ont les mêmes propriétés, ces courbes de k_r/P_c identifiées peuvent être introduites dans les fichiers de simulation sur les milieux vacuolaires pour la région matrice.

3.3 Simulations 2D vacuolaires

Dans ce paragraphe, les simulations numériques 2D effectuées sur les milieux vacuolaires E2, E4 et E6 sont résumées. On réalise une étude « qualitative » en testant un modèle d'écoulement diphasique hétérogène macroscopique : notre choix s'est porté sur un modèle de Darcy généralisé hétérogène composé de deux régions poreuses.

La première région correspond à la matrice dont les propriétés polyphasiques, k_r et P_c ont été identifiées dans le paragraphe précédent.

La deuxième région correspond aux vacuoles. La pression capillaire P_c au sein des vacuoles est nulle et la forme des perméabilités relatives k_r fait partie des propriétés dont la sensibilité doit être examinée. Le choix de k_r peut sembler a priori peu important dans les vacuoles. Cependant l'observation expérimentale a montré, en imbibition par exemple, que le front continue de progresser dans la matrice pendant que l'écoulement se développe dans les vacuoles. Bien que cette observation puisse être expliquée en partie par les effets capillaires, le rôle des mobilités des fluides dans les vacuoles reste à explorer. Dans cette optique, plusieurs types de perméabilités relatives exprimés sous la forme de Corey sont testés :

- Un premier jeu de k_r , noté **cas 1**, avec des coefficients de Corey α_o et α_w égaux à 0,01 est représenté dans la figure 3.7. Les mobilités des deux fluides sont plus importantes dans les vacuoles que dans la matrice sur une très large gamme de saturation. Les saturations varient de 0 à 1 car l'observation expérimentale indique que les vacuoles se saturent entièrement en fluide injecté.

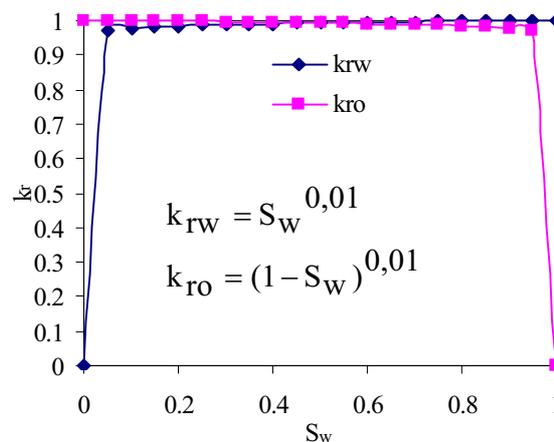


Figure 3.7. Choix de k_r pour le cas 1.

- Un second jeu de k_r , noté **cas 2**, avec des coefficients de Corey α_o et α_w égaux à 20 est représenté dans la figure 3.8. Dans cette configuration, les mobilités sont quasi nulles dans les vacuoles, excepté aux points limites.

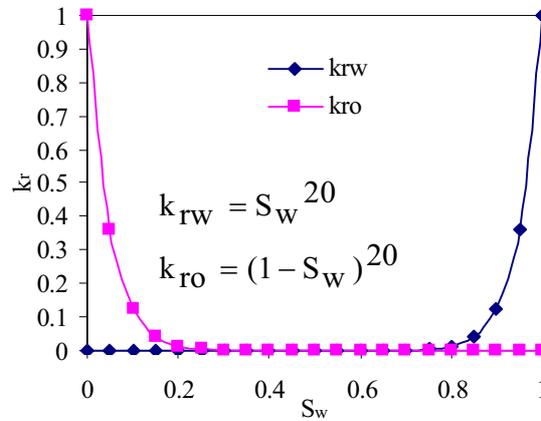


Figure 3.8. Choix de k_r pour le cas 2.

- Un troisième jeu de k_r dit « en croix », noté **cas 3**, avec des coefficients de Corey α_o et α_w égaux à 1 est représenté dans la figure 3.9. Au fur et à mesure de l'évolution de la saturation, la mobilité du fluide 1 augmente d'autant que la mobilité du fluide 2 est réduite.

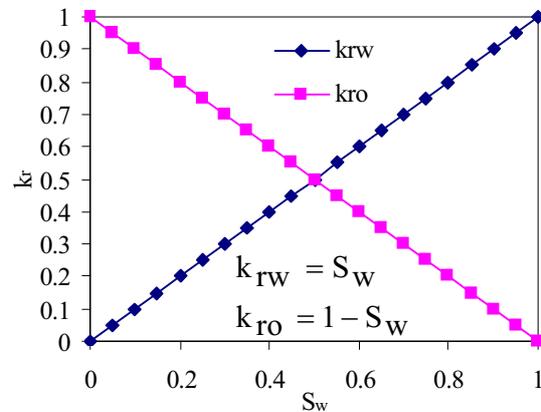


Figure 3.9. Choix de k_r pour le cas 3.

A ce stade, il reste à affecter une valeur de perméabilité à la zone de vacuole. Une méthode approchée (Lasseux et al., 2002) permet d'estimer la perméabilité absolue attribuée aux vacuoles. Les vacuoles sont assimilées à des cavités fluides à parois poreuses dans lesquelles on étudie la relation entre la vitesse moyenne et le gradient de pression. En utilisant la résolution du problème de Stokes et les hypothèses décrites dans le chapitre 2, la perméabilité absolue équivalente des vacuoles k_v est déterminée. Comme le terme $d^2/12$ de

l'équation (1.26) est prépondérant par rapport aux autres termes, k_v ne dépend que du diamètre d de la vacuole et est évaluée à une valeur supérieure à $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. Cependant, pour des questions de convergence numérique, une perméabilité k_v de $10 D$ est choisie dans cette région. Cette valeur de perméabilité attribuée à la vacuole est largement inférieure à celle estimée, cependant elle reste très supérieure aux perméabilités des régions matricielles des différents milieux. En couplant ce choix avec une pression capillaire nulle dans la région vacuolaire, on peut s'attendre à ce que le temps caractéristique de remplissage des vacuoles ne soit pas modifié induisant donc peu de variations des cinétiques de déplacement.

Les saturations en fin de processus (S_{wi} en fin de drainage ou S_{or} en fin d'imbibition) des milieux homogènes et vacuolaires associés sont généralement différentes : il convient donc de recalibrer le modèle k_r/P_c obtenu sur les milieux homogènes dans les gammes de saturations finales des milieux vacuolaires associés. Deux types de recalage ont été testés :

1. un premier où les différents coefficients de Corey sont conservés, seules les saturations réduites sont modifiées. La mobilité du fluide injecté est nulle en début de processus de déplacement et celle du fluide balayé est nulle en fin de processus.
2. un second où les courbes de k_r et de P_c homogènes ont été préservées mais tronquées aux saturations limites obtenues sur les milieux vacuolaires. Ainsi la mobilité du fluide balayé est différente de 0 en fin de processus ce qui pose des problèmes de convergence vers la saturation limite mesurée expérimentalement ainsi qu'en terme de ΔP . Pour ces raisons on a choisi de ne présenter que les résultats de simulation obtenus avec des perméabilités relatives modifiées suivant la procédure présentée au point 1.

Les simulations numériques 2D vacuolaires peuvent à présent être effectuées en testant les trois types de perméabilités relatives décrits précédemment.

3.3.1 Milieu E2

Le milieu vacuolaire E2 est associé au milieu homogène E1 dont les propriétés matricielles ont été identifiées dans le paragraphe 3.2.3. Ajouté aux caractéristiques des vacuoles décrites en introduction de ce paragraphe 3.3, un fichier de données spécifique à E2 est créé. Les simulations 2D vacuolaires (avec $\Delta p \neq 0$) sont exécutées pour les processus de

drainage et d'imbibition et ce, pour chaque jeu de perméabilités relatives. Les principaux paramètres de la simulation sont répertoriés dans le tableau 3.2.

Paramètres thermodynamiques	Paramètres pétrophysiques	Paramètres numériques
Type PVT : BO T°c=19 °c $\rho_w=1025 \text{ kg.m}^{-3}$ $\rho_o=831 \text{ kg.m}^{-3}$ $\mu_w=1.10^{-3} \text{ Pa.s}$ $\mu_o=11.10^{-3} \text{ Pa.s}$ P _{sortie} =1 bar	$k_m=37 \text{ mD}$ $\varepsilon_m=0,21$ $k_v=10000 \text{ mD}$ $\varepsilon_v=1$ Modèle k_r/P_c pour matrice Modèle k_r/P_c pour vacuoles ($P_c=0$ / k_r cas 1, 2 ou 3)	Option Labo Maillage régulier cartésien Nb mailles (NX,NY,NZ)=48*1*12 Taille de maille (DX,DY,DZ) : DX=0,004375 m DY=0,05 m DZ=0,004165 m
Drainage : Q=14,28 cc/h	Matrice	Vacuoles
Condition initiale en saturation	$S_w=1$	$S_w=1$
Condition finale en saturation	$S_{wi}=0,5$	$S_{wi}=0$
Imbibition : Q=9,8 cc/h		
Condition initiale en saturation	$S_{wi}=0,5$	$S_w=0$
Condition finale en saturation	$S_{or}=0,37$	$S_w=1$

Tableau 3.2. Paramètres de simulation.

3.3.1.1 Drainage du milieu E2

Dans cette partie, les trois cas de perméabilités relatives pour les vacuoles sont testés.

- **Cas 1**

Dans cette simulation, le choix de k_r pour les vacuoles est représenté sur la figure 3.7. Compte tenu des observations faites lors du drainage expérimental du milieu E2, un tel choix de k_r semble cohérent avec le mécanisme d'invasion privilégié des vacuoles par rapport à celui de la matrice.

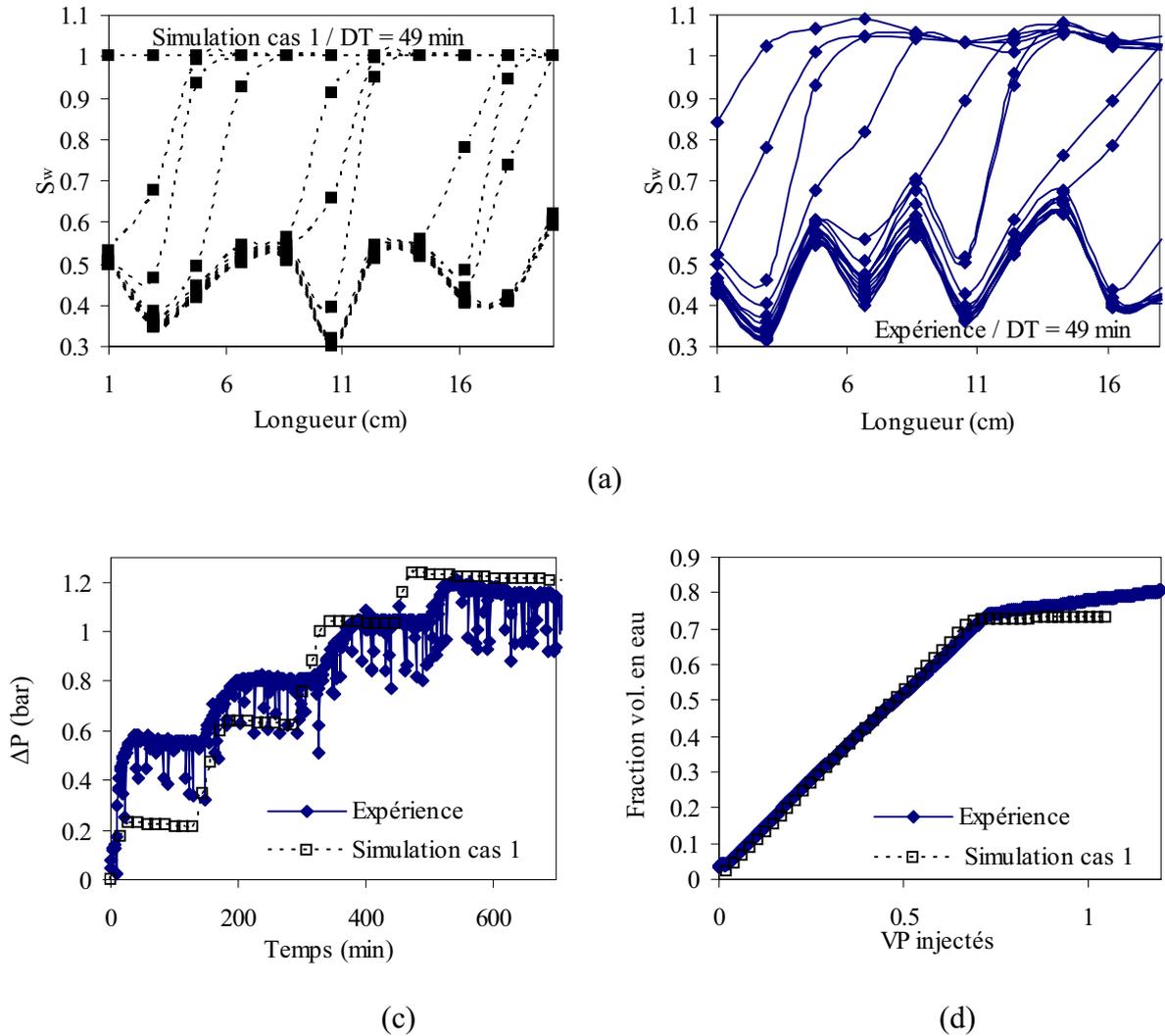


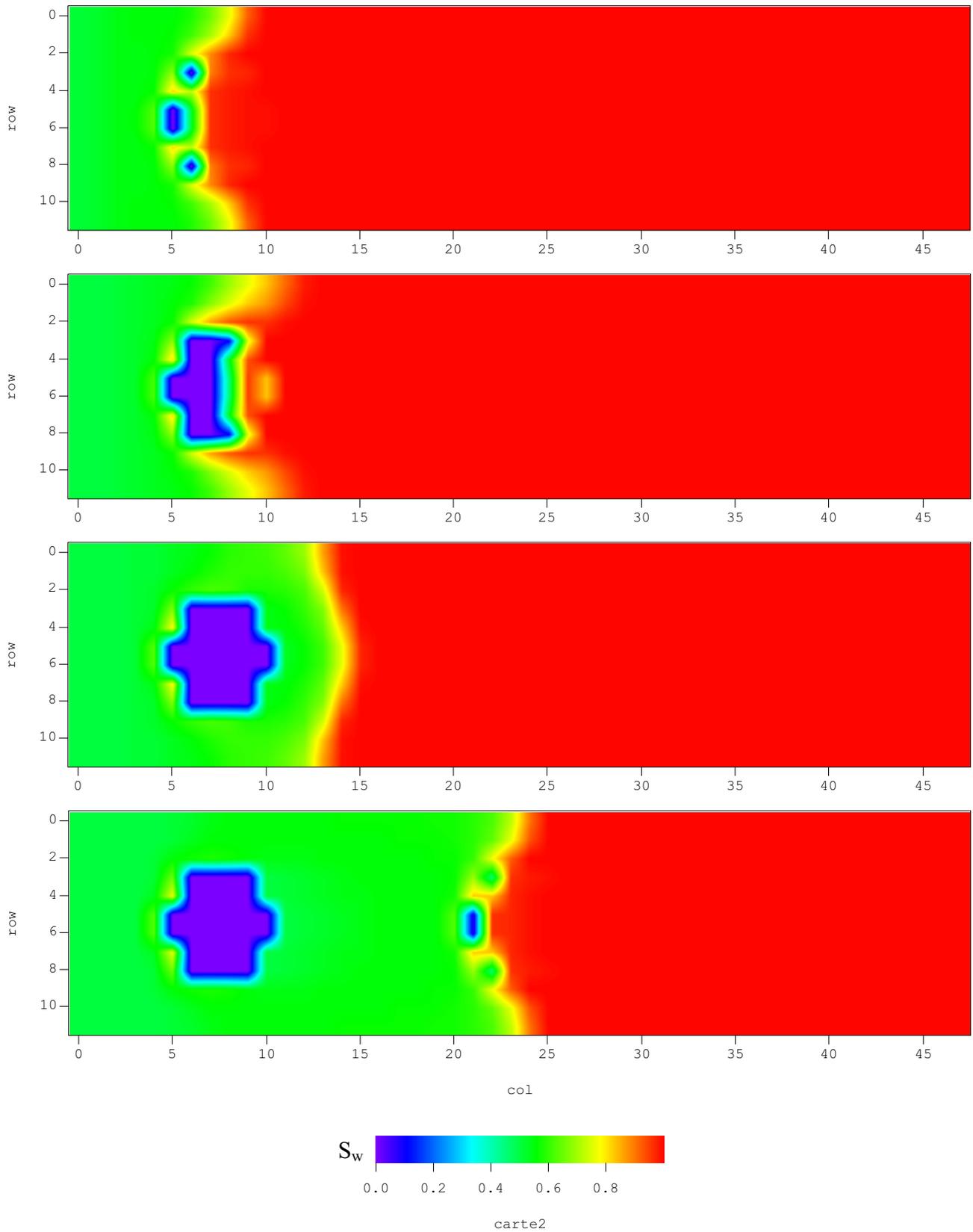
Figure 3.10. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 1 lors du drainage.

Les profils de saturation simulés sont très voisins des profils expérimentaux. Les vacuoles se saturent complètement en huile alors que le front ne progresse pas dans la matrice.

Par ailleurs, le signal de différence de pression ΔP corrobore cette observation. L'évolution de ΔP issue de la simulation est qualitativement en bon accord avec les données expérimentales : les plateaux correspondant aux étapes d'envahissement séquentiel des vacuoles sont parfaitement reproduits.

La courbe de production en saumure (volume de saumure produit normalisé par le volume de pores, VP) simulée est également très proche de la courbe expérimentale même si la simulation semble sous-estimer la production. La percée est bien reproduite.

Voici plusieurs cartographies des champs de saturation qui confirment les étapes d'invasion successive des vacuoles et de la matrice :



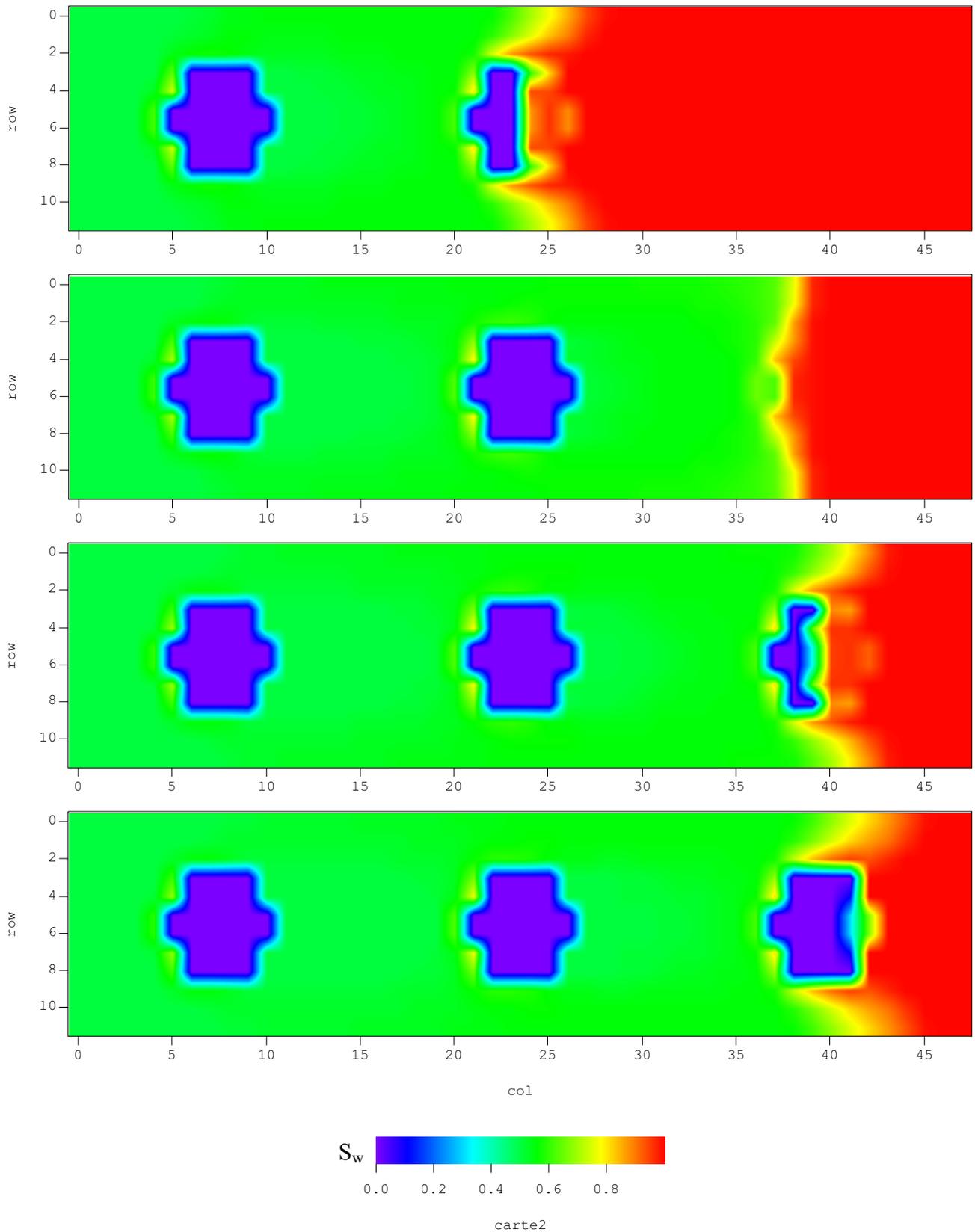


Figure 3.11. Champs de saturation en drainage cas 1.

• Cas 2

Dans cette simulation, le choix de k_r pour les vacuoles est représenté sur la figure 3.8. Contrairement à la remarque faite à propos du cas 1 et compte tenu des observations faites lors du drainage expérimental du milieu E2, un tel choix de k_r ne semble pas correspondre au mécanisme de déplacement par étapes de la matrice et des vacuoles dans lesquelles la mobilité des fluides est quasi nulle sur une large plage de saturation.

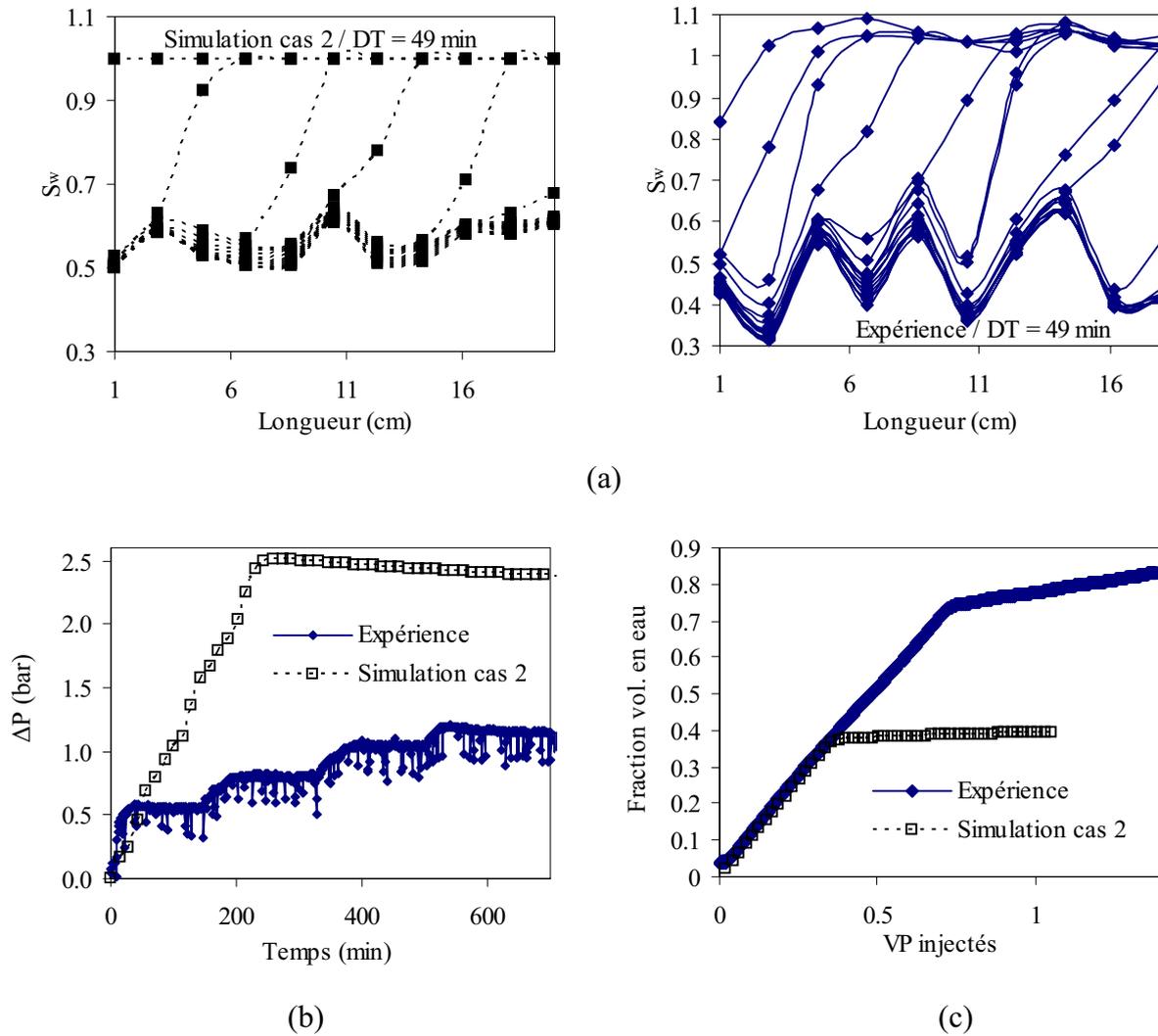


Figure 3.12. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 2 en drainage.

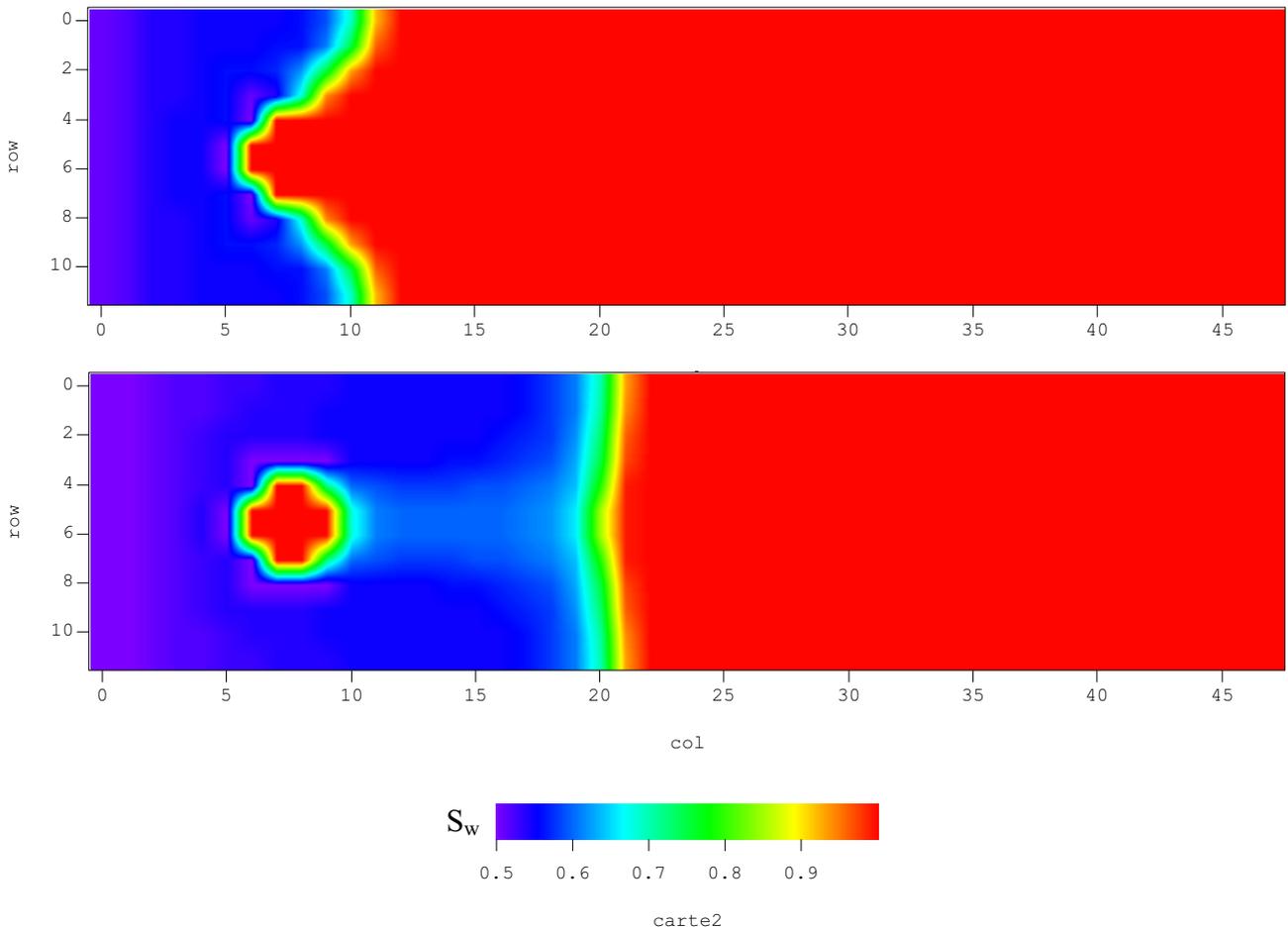
Le choix de perméabilités relatives du type cas 2 ne permet pas de reproduire correctement les mécanismes physiques observés lors du drainage expérimental. Dans cette simulation, les vacuoles ne parviennent pas à se remplir. De ce fait, les profils de saturation sont largement différents de ceux obtenus lors de l'expérience : le front se déplace dans la

matrice, tout en contournant les vacuoles et la percée est précoce (l'intervalle de temps entre deux profils simulé ou expérimental étant rigoureusement le même, le nombre de profils de saturation simulé est moins important que le nombre des profils expérimentaux avant percée).

Les vacuoles étant contournées par le front, les plateaux observés expérimentalement sur la perte de charge ne sont pas visibles. Le niveau maximal de différence de pression est surestimé et la percée est précoce.

Le drainage des vacuoles ne se réalise pas de manière complète, la courbe de production en saumure simulée est très éloignée de la production observée expérimentalement : la saumure présente dans les vacuoles n'étant pas drainée complètement et la récupération en saumure qui montre bien une percée très précoce est bien inférieure à la récupération expérimentale.

Sur les cartographies qui suivent, on voit clairement que la saumure présente dans les vacuoles n'est pas balayée par l'huile.



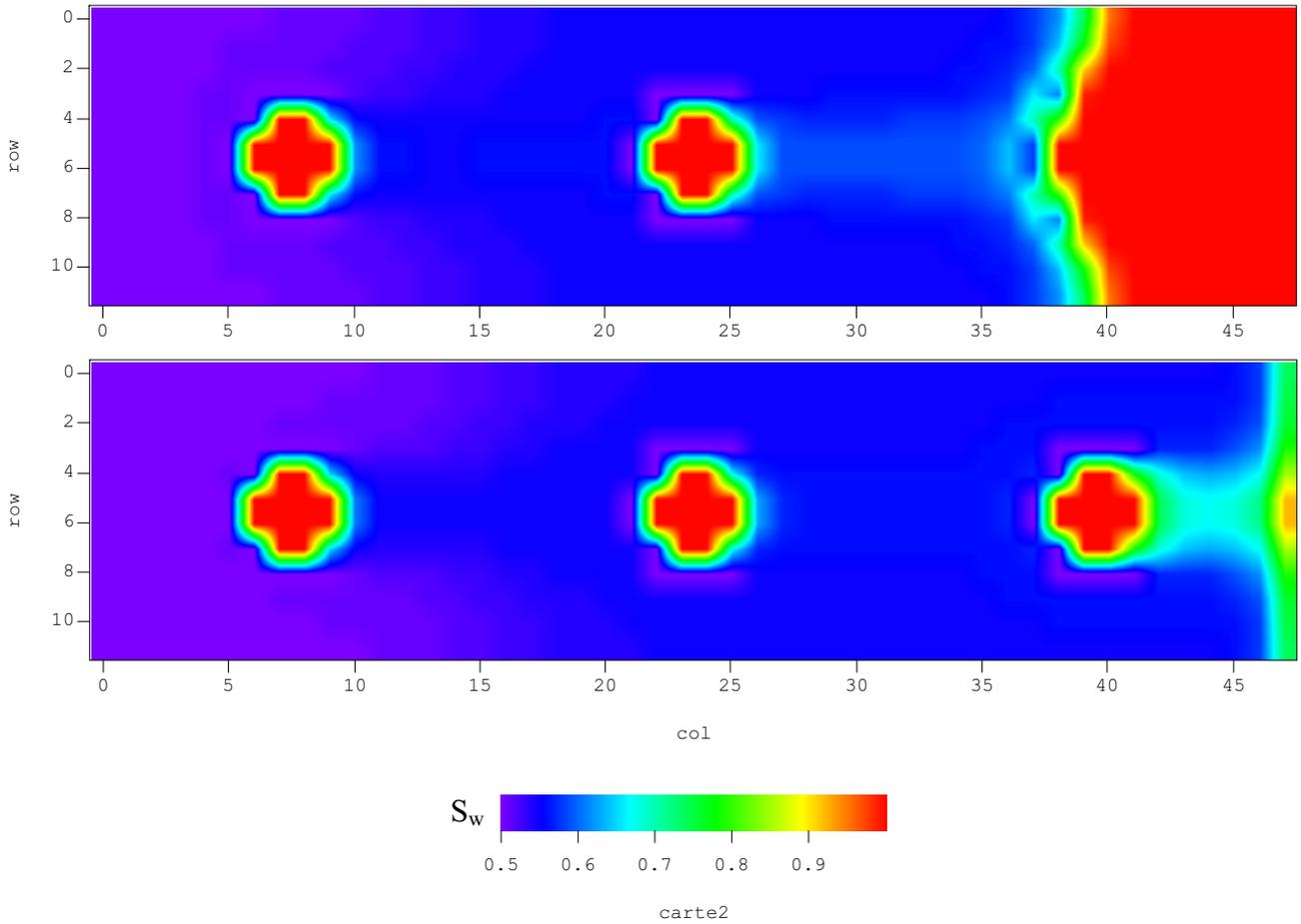
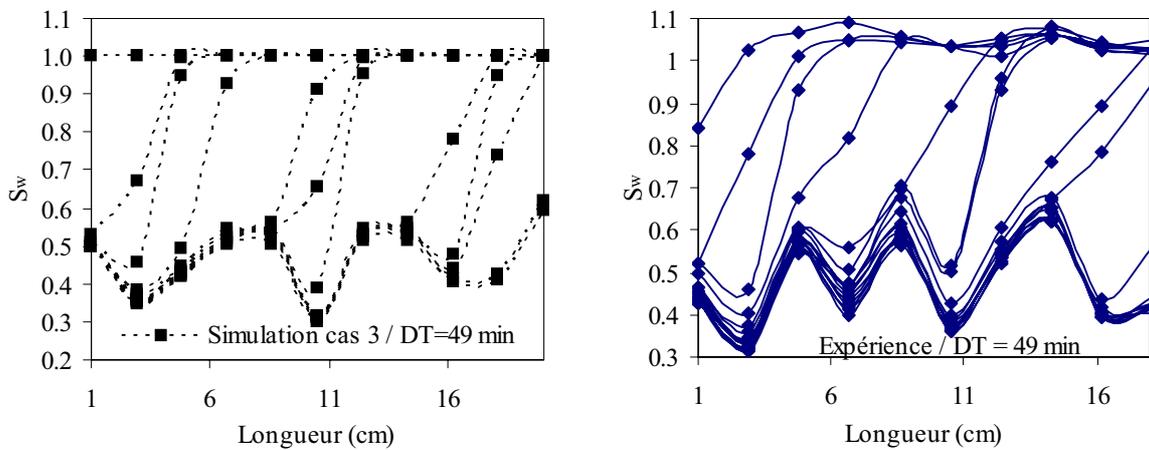


Figure 3.13. Champs de saturation en drainage cas 2.

- **Cas 3**

Dans ce test, le jeux de k_r introduit dans les données de simulation est représenté sur la figure 3.9.



(a)

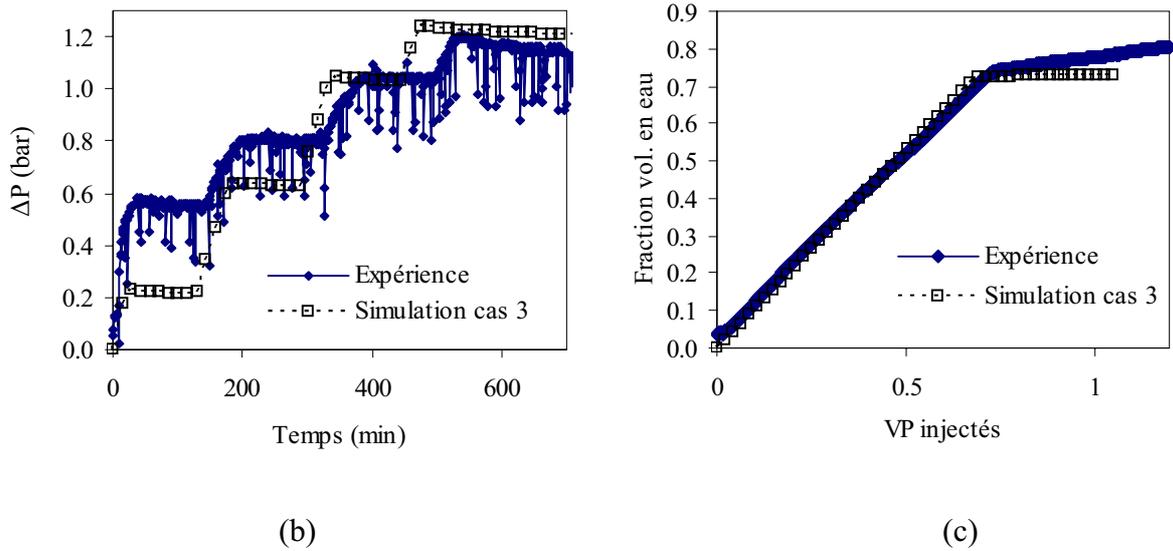


Figure 3.14. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 3 en drainage.

Il est intéressant de noter que les résultats de simulation de la figure 3.14 sont quasi identiques à ceux obtenus avec le cas 1 (voir figure 3.10) : les profils de saturation, le signal de différence de pression et la courbe de production sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, les mêmes remarques effectuées concernant le cas 1 peuvent être faites pour ce cas 3.

3.3.1.2 Imbibition du milieu E2

Comme pour le drainage, les trois jeux de perméabilités relatives pour la région vacuolaire sont testés. Les paramètres de simulation utilisés sont répertoriés dans le tableau 3.2.

- **Cas 1**

Les courbes de profils de saturation, du signal de différence de pression ΔP et de la récupération issues de la simulation sont comparées aux courbes expérimentales.

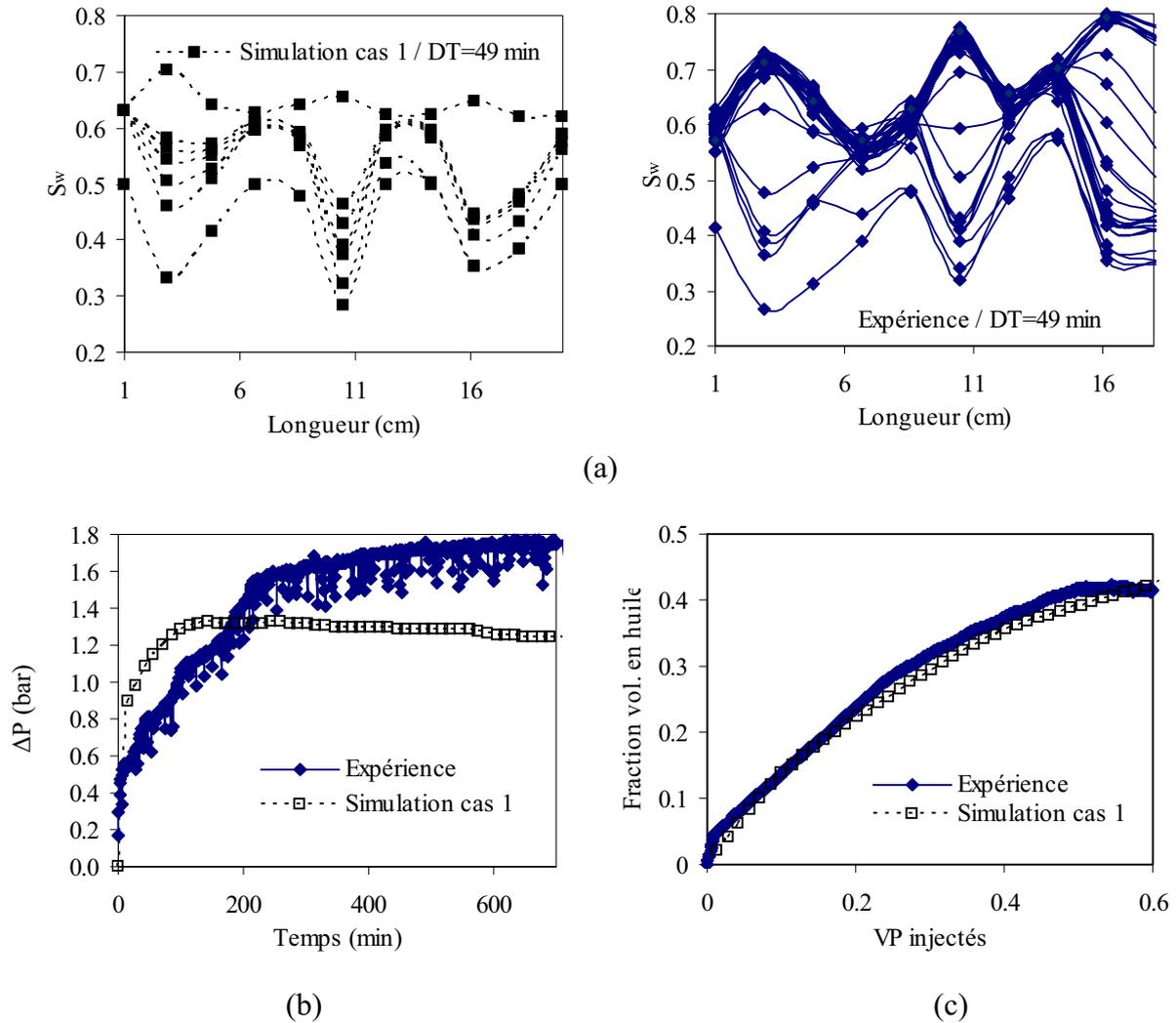


Figure 3.15. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 1 en imbibition.

Pour un temps équivalent, le profil de saturation en fin d'imbibition expérimentale est assez différent du profil d'imbibition numérique. En effet, les vacuoles ne sont pas complètement saturées en eau en fin de simulation (correspondant à la fin de l'imbibition expérimentale soit $t_{\text{exp}} \sim 23\text{h}$). Les vacuoles se désaturent très difficilement lors de la simulation puisque la saturation complète en eau n'intervient qu'après l'équivalent d'une semaine d'injection (soit environ 10 VP de saumure injectée).

Le signal de différence de pression ΔP obtenu numériquement est lui aussi assez peu représentatif du signal expérimental. Le niveau maximal de ΔP est sous-estimé et la percée intervient prématurément. Comme lors de l'expérience, les plateaux ne sont pas observés, le

front de déplacement dans la matrice progressant simultanément avec les remplissages des vacuoles, remplissages non séquentiels cette fois-ci.

Malgré une percée plus précoce, la cinétique de production est très voisine de celle observée lors de l'imbibition expérimentale. Il apparaît donc clairement que le signal de production n'est pas la variable la plus sensible pour rendre compte précisément de la nature de l'écoulement.

Les cartographies des champs de saturation de la figure 3.16 montrent que le front de déplacement a tendance à contourner les vacuoles et à progresser dans la matrice.

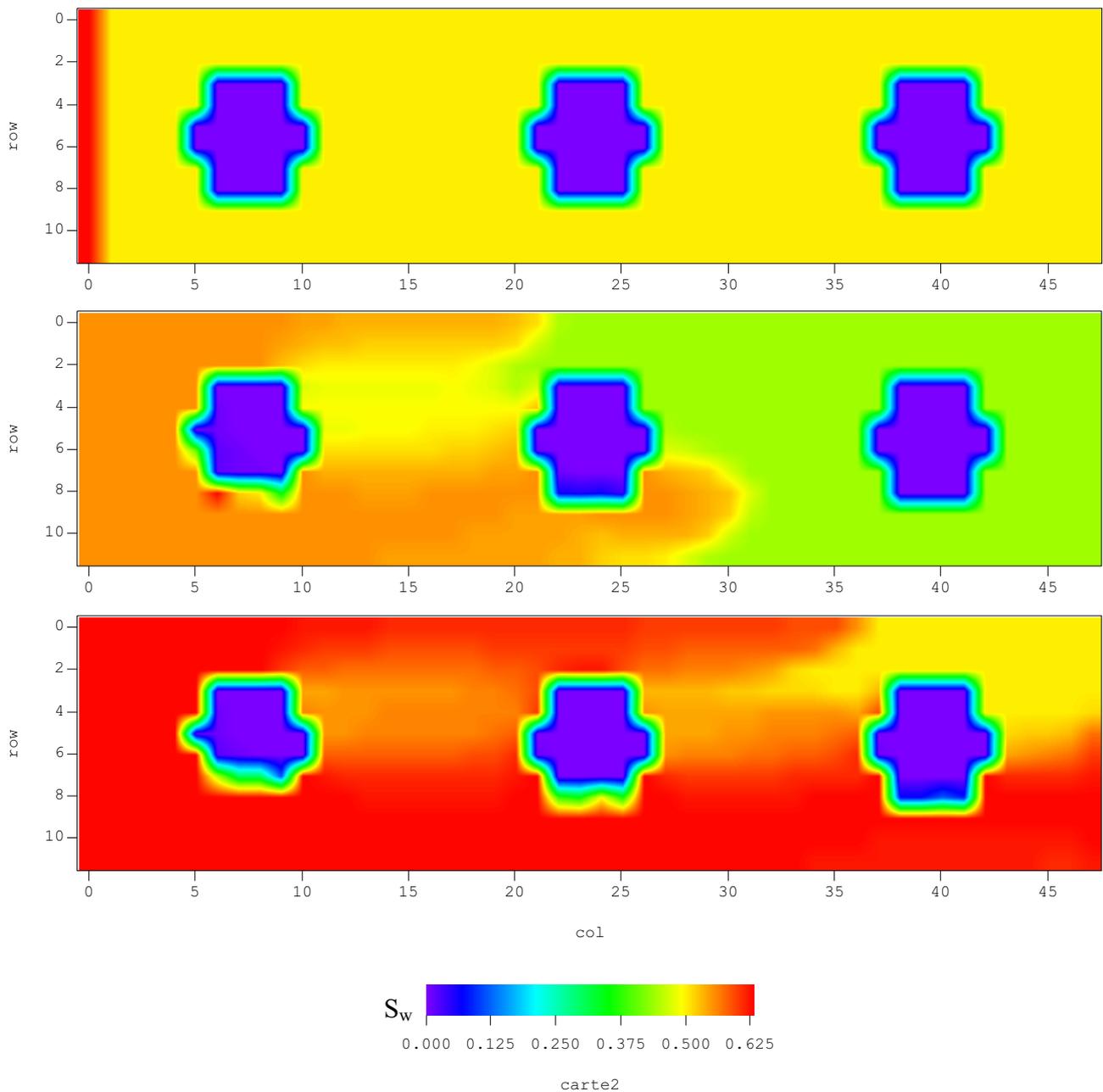


Figure 3.16. Champs de saturation en imbibition cas 1.

• **Cas 2**

Le jeu de perméabilités relatives k_r pour les vacuoles décrit dans la figure 3.8 est utilisé ici dans les données de simulation. La comparaison des différentes courbes de saturation, de pression et de production est effectuée dans la figure 3.17.

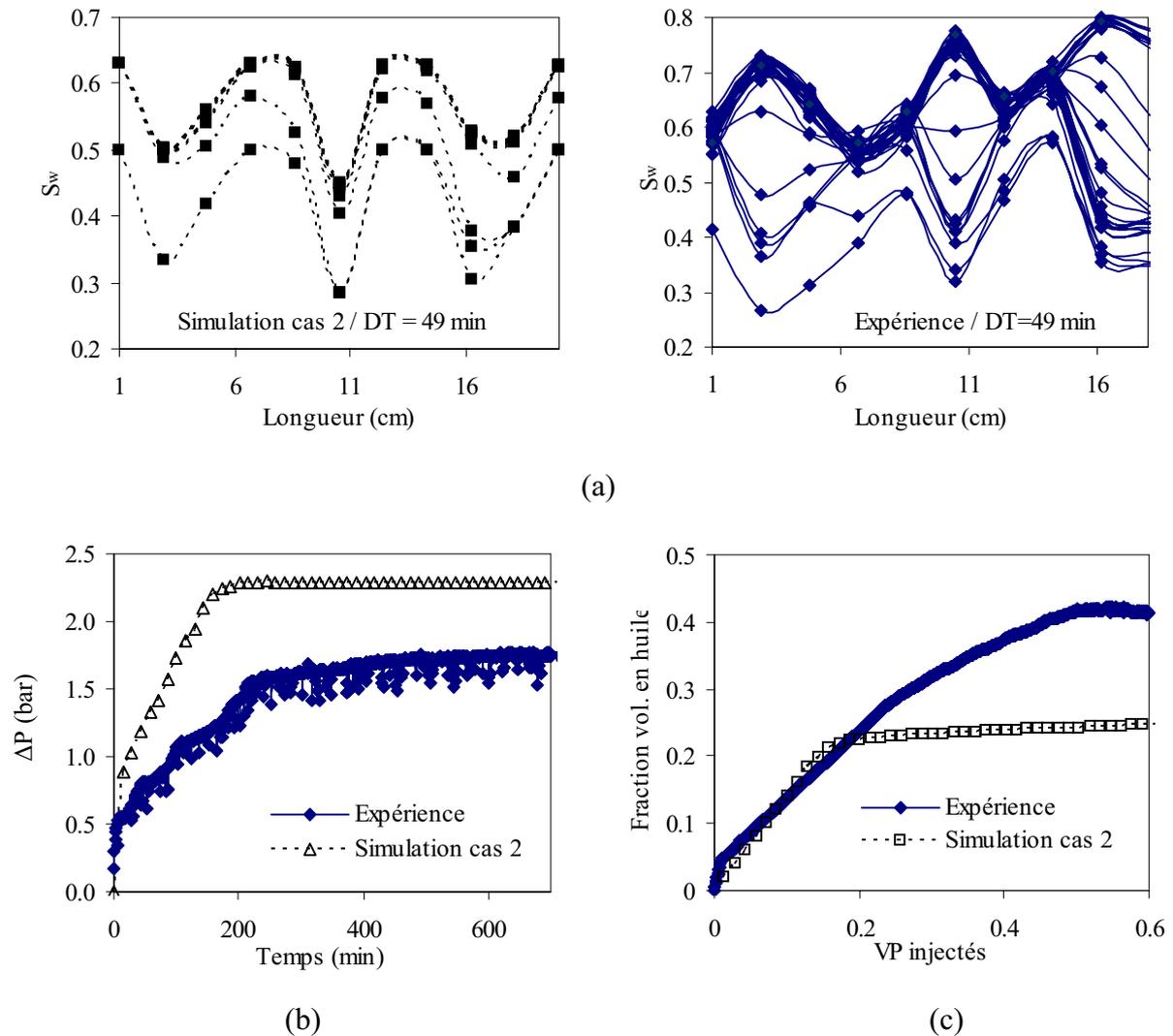


Figure 3.17. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 2 en imbibition.

Les profils de saturation issus de la simulation indiquent que l'huile présente dans les vacuoles reste piégée. L'imbibition ne se produit pas dans les vacuoles, le front se déplace exclusivement dans la matrice. La percée est logiquement plus précoce : les signaux de différence de pression et de récupération en témoignent. Le niveau de pression maximal est surestimé contrairement à la récupération qui est sous-estimée.

Dans ce cas, les résultats de la simulation numérique ne sont pas en bon accord avec les observations expérimentales. L'huile présente dans les vacuoles n'est pas balayée comme le montrent les cartographies de la figure 3.18.

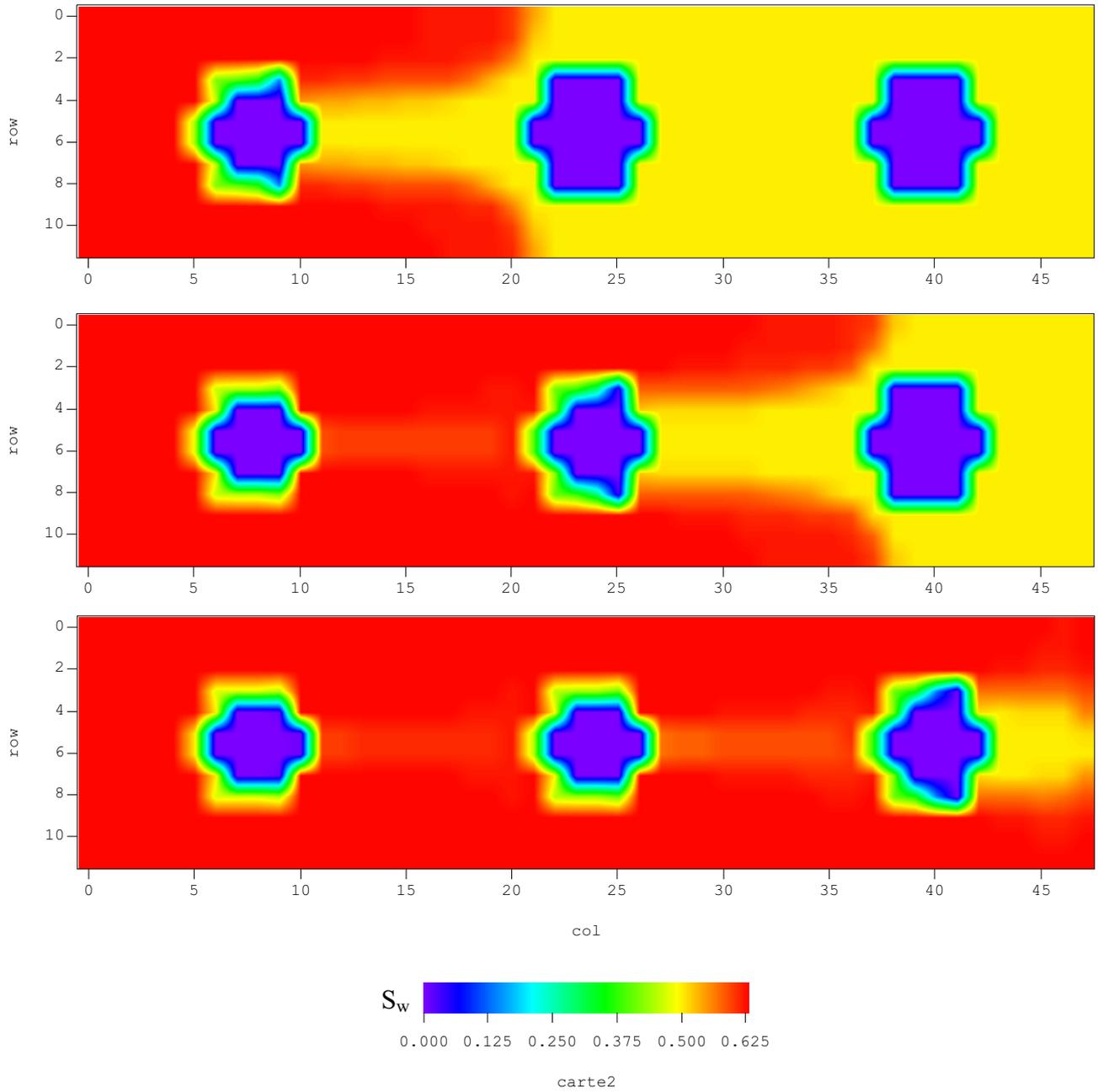


Figure 3.18. Champs de saturation en imbibition cas 2.

• **Cas 3**

Le jeu de perméabilités relatives testé ici est décrit sur la figure 3.9.

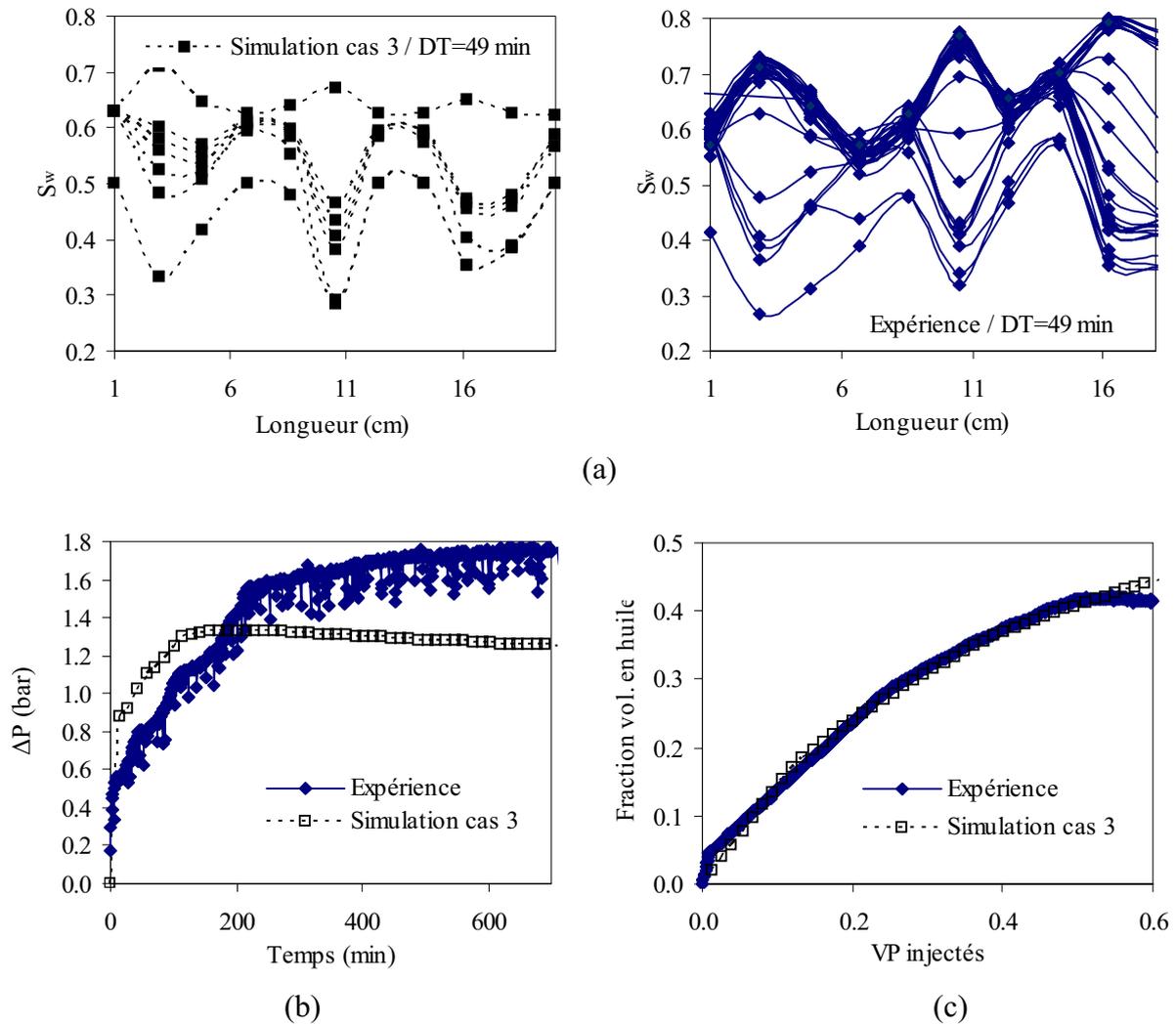


Figure 3.19. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 3 en imbibition.

Les résultats de la simulation sont très proches de ceux obtenus avec le cas 1 (Figure 3.15), conduisant aux mêmes remarques. Compte tenu des résultats tout à fait identiques obtenus dans les cas 1 et 3 en drainage et en imbibition, nous nous limiterons, dans le reste du travail, à des simulations utilisant les courbes de k_r des cas 1 et 2.

3.3.2 Milieu E4

Le milieu vacuolaire E4 est associé au milieu homogène E3 dont les propriétés matricielles ont été identifiées dans le paragraphe 3.2.2. Des simulations 2D vacuolaires avec $\Delta p \neq 0$ ont été effectuées pour les courbes de perméabilités relatives k_r des cas 1 et cas 2.

Paramètres thermodynamiques	Paramètres pétrophysiques	Paramètres numériques
Type PVT : BO T [°] c=19 °c $\rho_w=1046 \text{ kg.m}^{-3}$ $\rho_o=840 \text{ kg.m}^{-3}$ $\mu_w=1.10^{-3} \text{ Pa.s}$ $\mu_o=11.10^{-3} \text{ Pa.s}$ P _{sortie} =1 bar	$k_m=136 \text{ mD}$ $\epsilon_m=0,23$ $k_v=10000 \text{ mD}$ $\epsilon_v=1$ Modèle k_r/P_c pour matrice Modèle k_r/P_c pour vacuoles ($P_c=0 / k_r$ cas 1, 2)	Option Labo Maillage régulier cartésien Nb mailles (NX,NY,NZ)=48*1*12 Taille de maille (DX,DY,DZ) : DX=0,0043125 m DY=0,049 m DZ=0,0039167 m
Drainage : Q=29,478 cc/h	Matrice	Vacuoles
Condition initiale en saturation	$S_w=1$	$S_w=1$
Condition finale en saturation	$S_{wi}=0,45$	$S_{wi}=0$
Imbibition : Q=5,75 cc/h		
Condition initiale en saturation	$S_w=0,45$	$S_w=0$
Condition finale en saturation	$S_{or}=0,37$	inachevé

Tableau 3.3. Paramètres de simulation.

3.3.2.1 Drainage du milieu E4

Le modèle de k_r/P_c identifié à partir du milieu homogène E3 pour le drainage (Tableau 3.1) est intégré dans le fichier de données pour la région matricielle. Les conditions initiale et finale en terme de saturation sont indiquées dans le tableau 3.3.

- **Cas 1**

Comme pour le drainage du milieu E2, le jeu de k_r/P_c utilisé dans ce cas semble bien approprié pour reproduire les différentes étapes d'invasion séquentiel de la matrice et des vacuoles. Les résultats de simulation des profils de saturation, du signal de différence de pression et de la récupération sont décrits sur les courbes de la figure 3.20 :

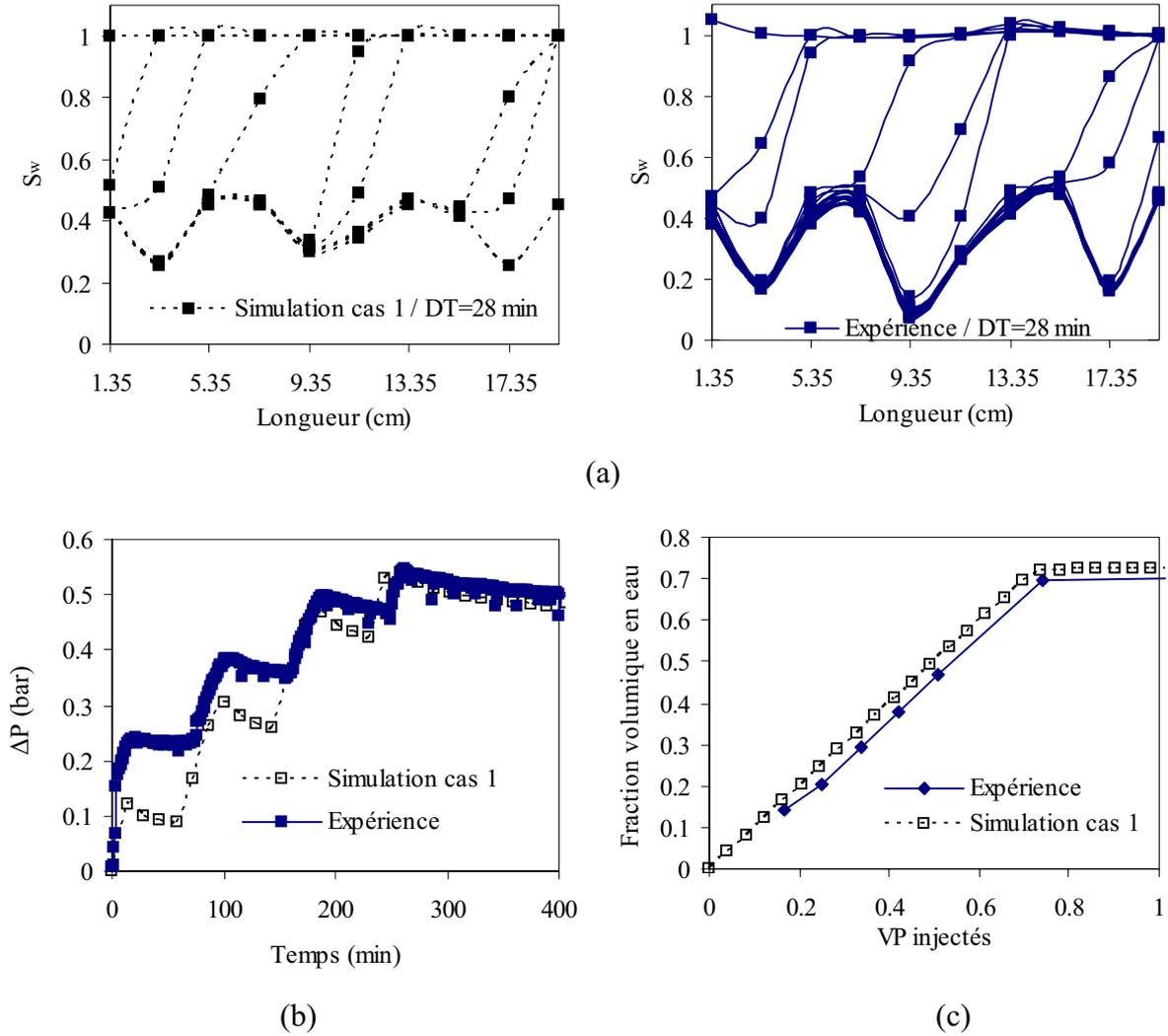


Figure 3.20. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 1 en drainage.

Les profils de saturation simulés et expérimentaux sont du même type. A chaque étape séquentielle d'invasion des vacuoles, le front reste quasi immobile dans la matrice.

De ce fait, on retrouve les trois plateaux correspondant aux remplissages des vacuoles à pression capillaire nulle, bien que le niveau global de ΔP soit sous-estimé numériquement.

Les cinétiques de production simulée et expérimentale sont en bon accord.

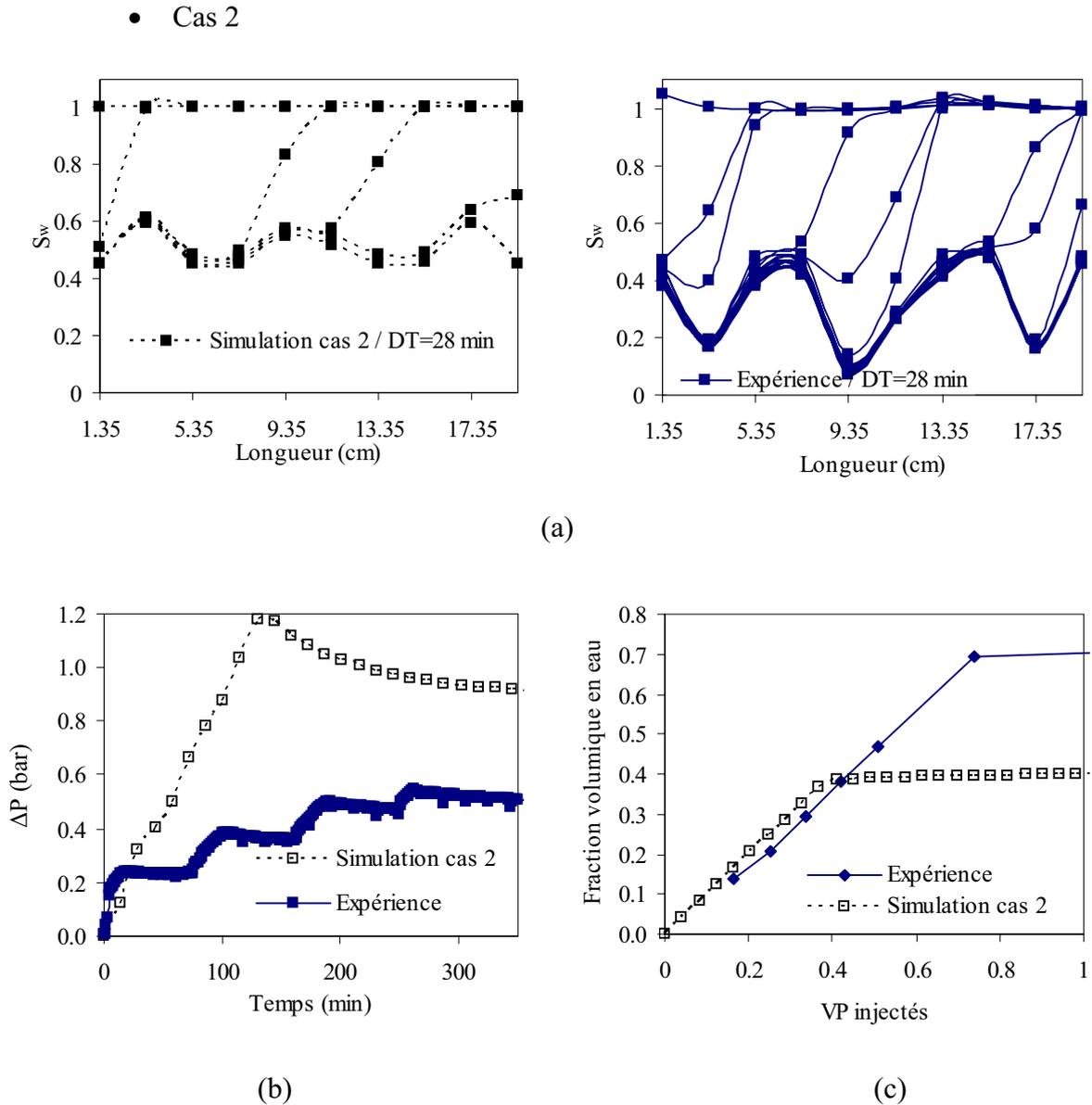


Figure 3.21. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 2 en drainage.

Les courbes de k_r correspondant au cas 2 ne permettent pas de reproduire le processus d'envahissement séquentiel des vacuoles. Les profils simulés sont très différents des profils expérimentaux. Dans le cas de la simulation et en contradiction avec l'expérience, il y a déplacement de saumure uniquement dans la matrice. De ce fait, la percée est plus précoce (et donc les profils sont moins nombreux avant percée).

Le signal de différence de pression confirme à la fois une percée précoce et un processus d'envahissement matriciel exclusif (pas de plateaux).

La production en saumure est sous-estimée lors de la simulation, l'eau présente dans les vacuoles n'est pas drainée.

3.3.2.2 Imbibition du milieu E4

Les conditions initiale et finale en terme de saturation sont indiquées dans le tableau 3.3.

• Cas 1

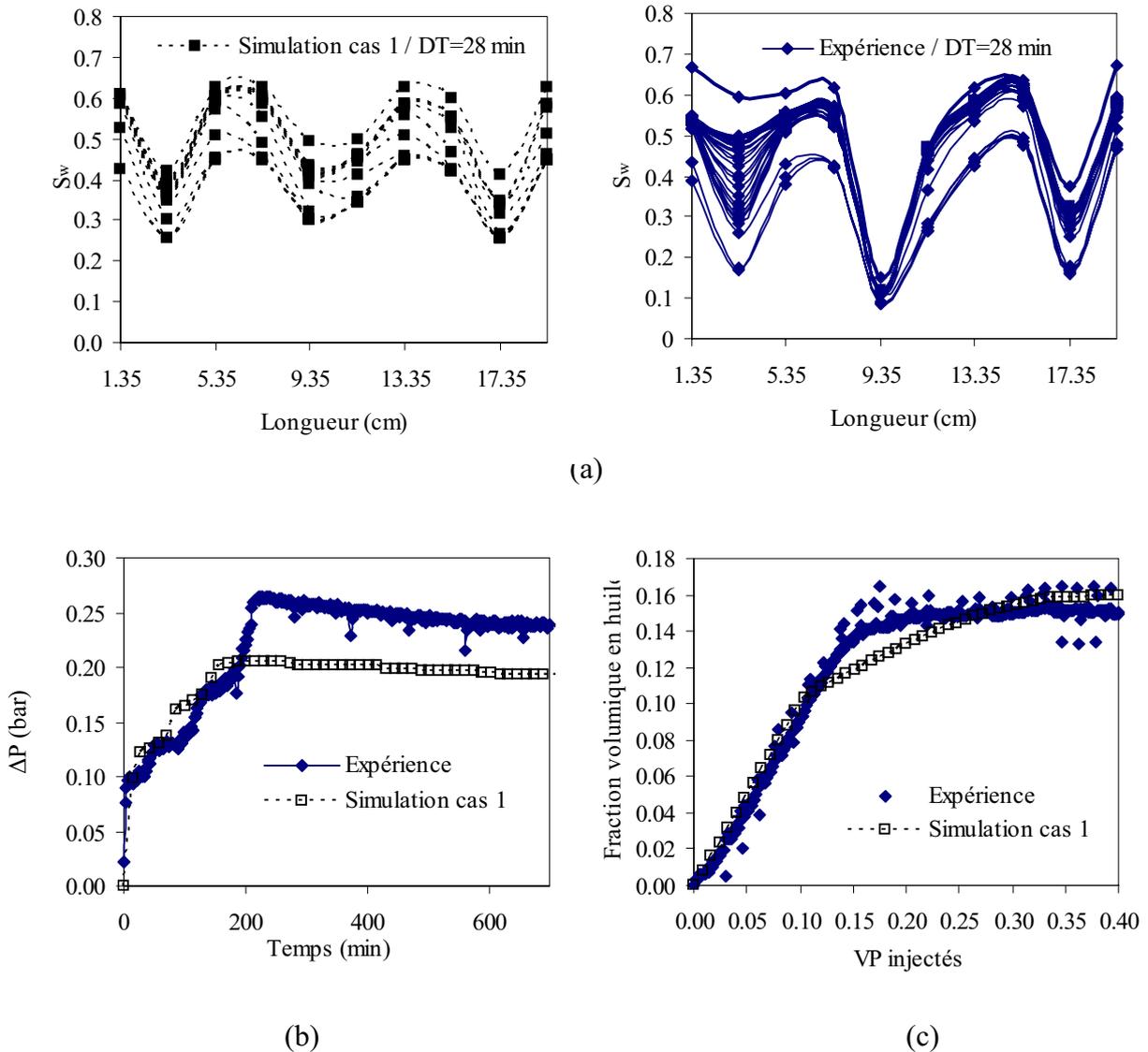


Figure 3.22. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 1 en imbibition.

Lors de l'expérience, les vacuoles n'ont pu être complètement saturées en saumure : les profils simulés confirment cette tendance.

Le résultat numérique d'évolution de ΔP est assez proche de la courbe expérimentale même si le niveau de pression maximal après percée est plus faible.

Enfin la cinétique de production est correctement simulée.

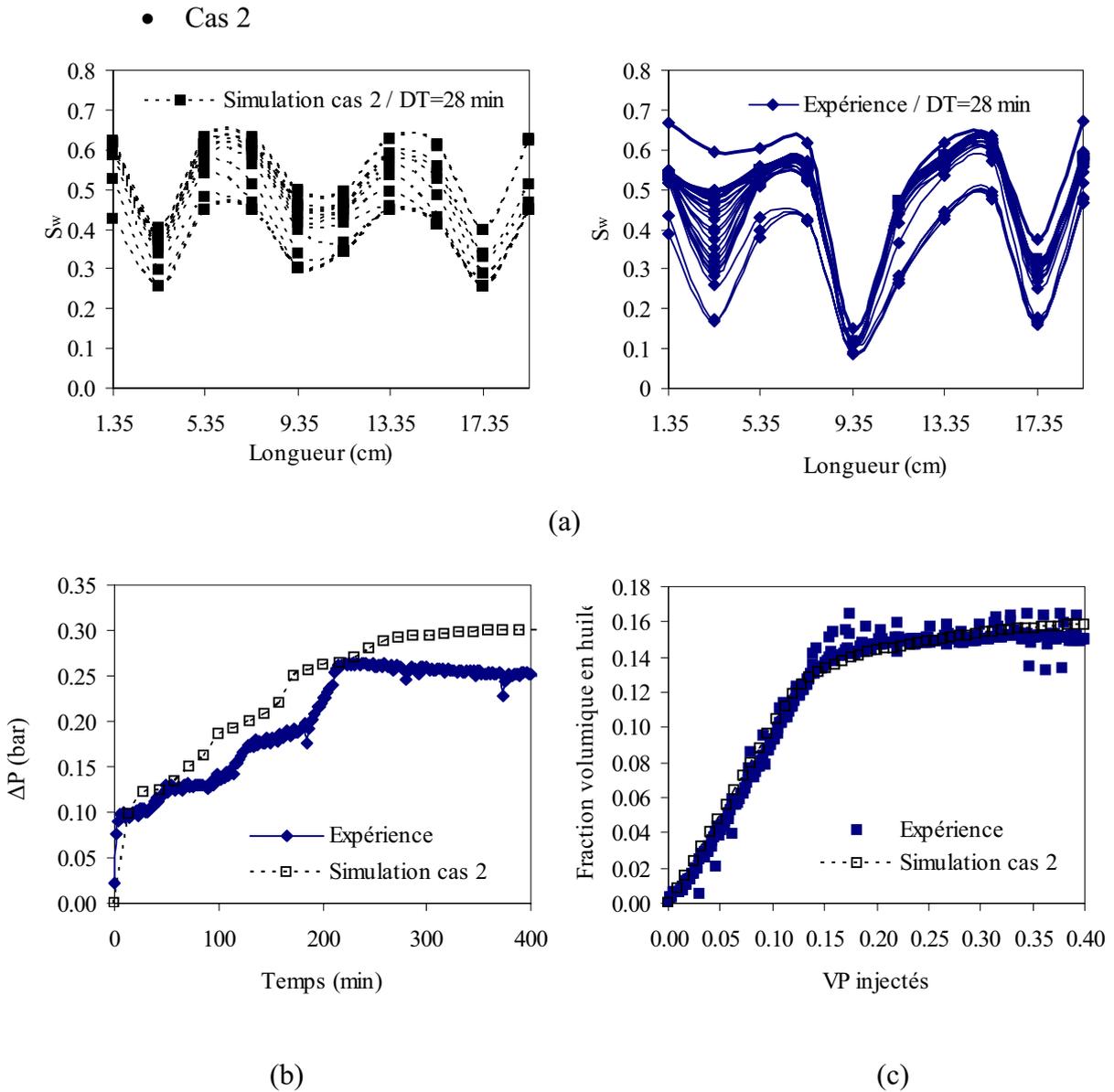


Figure 3.23. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) et de la récupération (c) pour le cas 2 en imbibition.

Les profils simulés correspondant au cas 2 sont très proches des profils simulés dans le cas 1 : la modification de la mobilité des fluides dans les vacuoles ne semble pas être très sensible dans le processus d'imbibition.

Le signal ΔP simulé est en assez bon accord avec l'expérience, même si le niveau de pression maximal est quelque peu surestimé.

Le calage de production simulée et expérimentale est bon, la cinétique de déplacement est respectée.

3.3.3 Milieu E6

Le milieu vacuolaire E6 est associé au milieu homogène E5. Les caractéristiques de la matrice ont été identifiées dans le paragraphe 3.2.3. On réalise cette fois-ci des simulations 2D vacuolaires avec $\Delta\rho=0$. Dans les vacuoles, les jeux de perméabilités relatives k_r cas 1 et cas 2 sont successivement testés.

Les différents paramètres de simulation sont indiqués dans le tableau 3.4 :

Paramètres thermodynamiques	Paramètres pétrophysiques	Paramètres numériques
Type PVT : BO T [°] c=19 °c $\rho_w=1045 \text{ kg.m}^{-3}$ $\rho_o=10449 \text{ kg.m}^{-3}$ $\mu_w=1.10^{-3} \text{ Pa.s}$ $\mu_o=17.10^{-3} \text{ Pa.s}$ P _{sortie} =1 bar	$k_m=111 \text{ mD}$ $\epsilon_m=0,2$ $k_v=10000 \text{ mD}$ $\epsilon_v=1$ Modèle k_r/P_c pour matrice Modèle k_r/P_c pour vacuoles ($P_c=0 / k_r$ cas 1, 2)	Option Labo Maillage régulier cartésien Nb mailles (NX,NY,NZ)=48*1*12 Taille de maille (DX,DY,DZ) : DX=0,004375 m DY=0,05 m DZ=0,004165 m
Drainage : Q=22,3 cc/h	Matrice	Vacuoles
Condition initiale en saturation	$S_w=1$	$S_w=1$
Condition finale en saturation	$S_{wi}=0,3$	$S_{wi}=0$
Imbibition : Q=6 cc/h		
Condition initiale en saturation	$S_{wi}=0,3$	$S_w=0$
Condition finale en saturation	$S_{or}=0,44$	$S_w=1$

Tableau 3.4. Paramètres de simulation.

3.3.3.1 Drainage du milieu E6

Des simulations de drainage dans les conditions identiques à l'expérience ont été réalisées. Seuls les profils de saturation et la courbe de différence de pression sont analysés, la récupération n'apportant aucune information. Les conditions initiale et finale en terme de saturation sont indiquées dans le tableau 3.4.

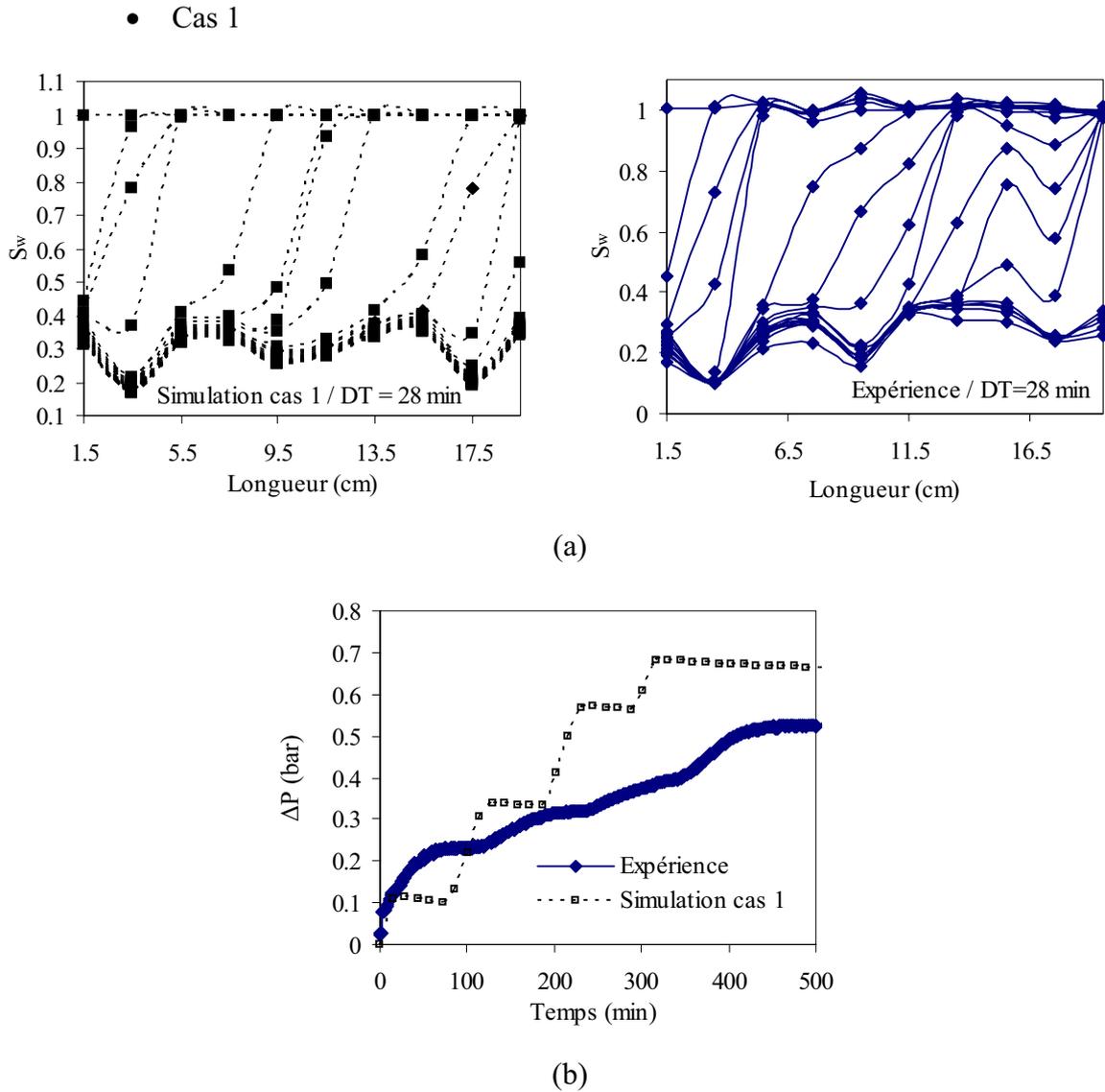
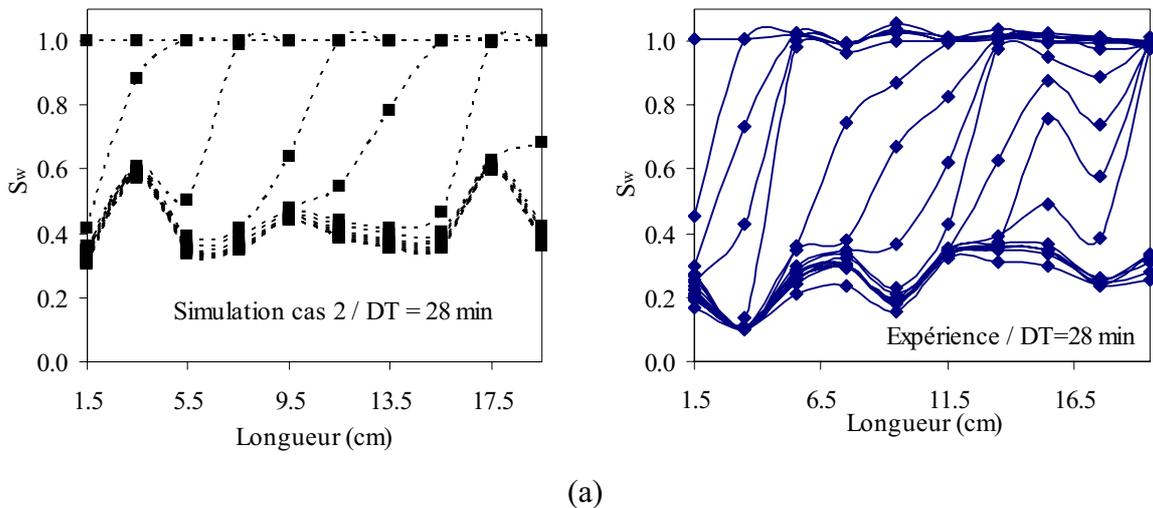


Figure 3.24. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) pour le cas 1 en drainage.

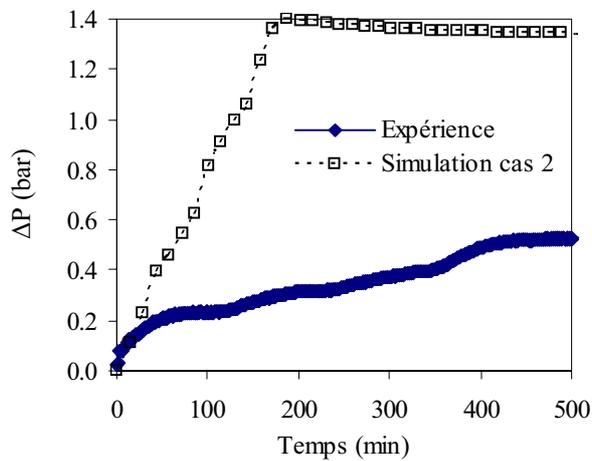
Les profils de saturation simulés sont ici assez proches des profils expérimentaux. Comme pour les milieux E2 et E4, la simulation met en évidence les étapes successives d'envahissement distinctes matrice/vacuoles.

Le signal de différence de pression simulé corrobore (en l'amplifiant) ce résultat, les plateaux étant largement visibles. Même si le calage n'est pas complètement satisfaisant, le jeu de k_r cas 1 semble relativement bien adapté.

• Cas 2



(a)



(b)

Figure 3.25. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) pour le cas 2 en drainage.

Avec ce jeu de k_r , les vacuoles ne sont pas drainées contrairement au comportement observé durant l'expérience. La simulation conduit à une percée trop précoce, le front de déplacement progresse plus vite dans le cas simulé.

Quant au signal ΔP issu de la simulation, il est surestimé et très éloigné de la courbe expérimentale.

Il est important de noter qu'une étude simplifiée de sensibilité aux différents paramètres k_r et P_c sur E4 a été réalisée et a montré que, comme pour le milieu homogène E3. Les résultats d'évolution des fronts et de la perte de charge globale indiquent que :

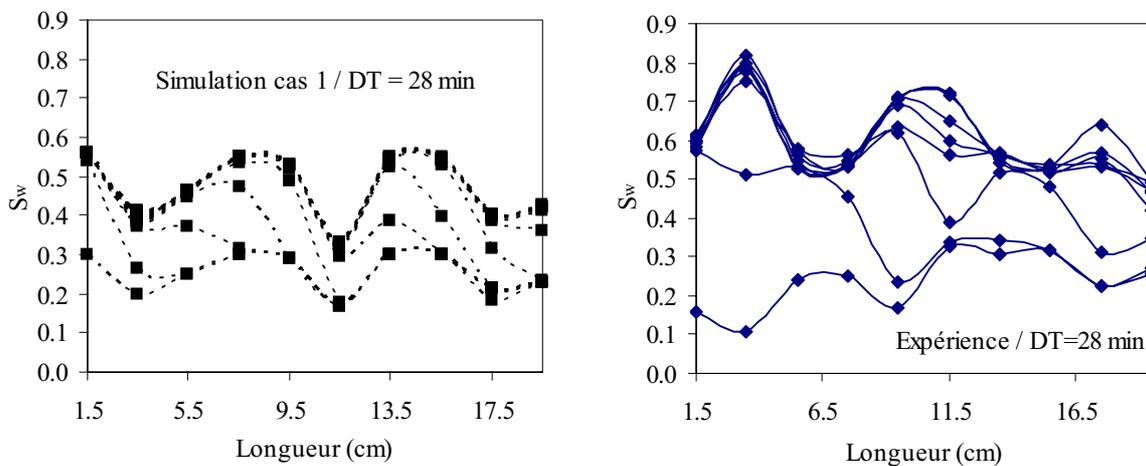
- les coefficients sur les perméabilités relatives ont une influence prépondérante en drainage,
- les coefficients sur la pression capillaire sont très sensibles en imbibition.

On a également noté que lors des simulations d'imbibition avec variation de P_c , les signaux de différence de pression varient plus fortement lors des tests effectués avec le cas 1 que lors des tests effectués avec le cas 2. L'impact de la pression capillaire est d'autant plus fort que la perméabilité effective de la zone vacuolaire est forte (voir annexe 2).

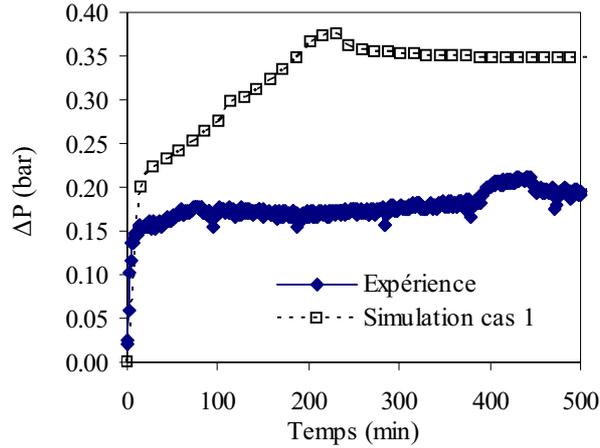
3.3.3.2 Imbibition du milieu E6

Les conditions initiale et finale en terme de saturation sont répertoriées dans le tableau 3.4.

- Cas 1



(a)

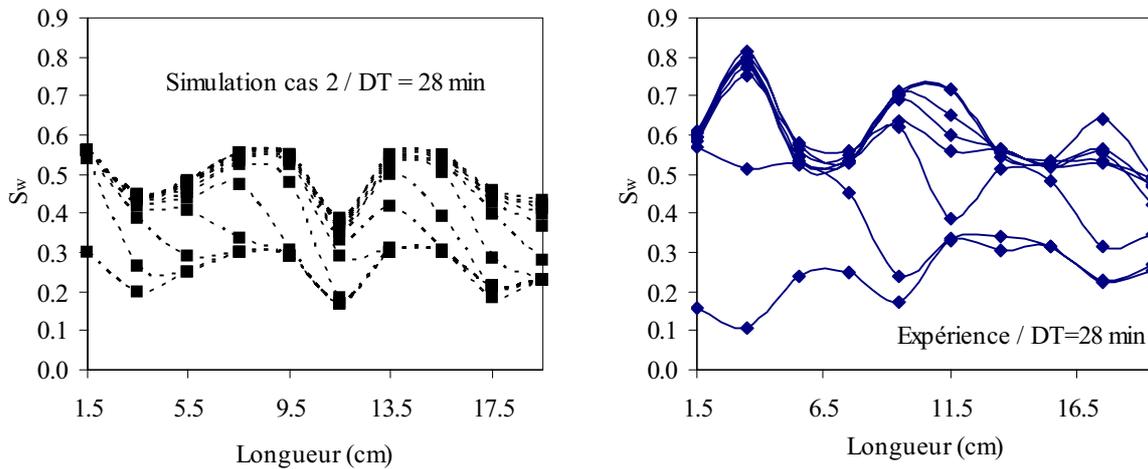


(b)

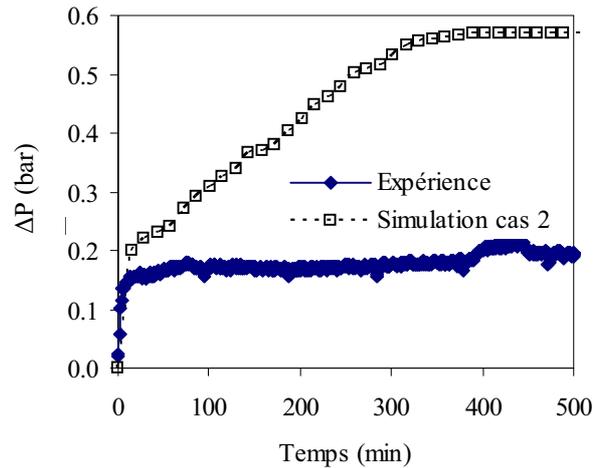
Figure 3.26. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) pour le cas 1 en imbibition.

Dans le cas de la simulation, l'imbibition ne se produit pas dans les vacuoles contrairement à l'expérience. Les profils de saturation sont donc très différents.

Une remarque identique peut être faite pour le signal de différence de pression ΔP indiquant une percée précoce et surestimant le niveau de pression maximal.



(a)



(b)

Figure 3.27. Comparaison simulation/expérience des profils de saturation (a), du signal de différence de pression (b) pour le cas 2 en imbibition.

La forme des profils de saturation obtenue avec les courbes de k_r correspondant au cas 2 est quasi identique aux profils simulés avec le cas 1 et donc largement différente des profils expérimentaux.

Le signal ΔP obtenu par simulation est différent dans sa forme et surestimé dans sa valeur en comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation correspondant au cas 1. Par contre, le temps de percée obtenu dans le cas 2 est mieux calé avec l'expérience que lors du test avec le cas 1.

Lors de cette imbibition du milieu E6, il est difficile de préciser quel est le choix de k_r le mieux adapté pour décrire l'écoulement. Il est vraisemblable que la mouillabilité du système saumure/dibutyl-phthalate/roche joue un rôle important. Ce point n'a pas été exploré plus avant dans le cadre de ce travail.

Concernant l'étude numérique des milieux vacuolaires E2 ($\Delta\rho\neq 0$), E4 ($\Delta\rho\neq 0$) et E6 ($\Delta\rho=0$), on a remarqué que :

1. pour les différents drainages, les simulations intégrant les k_r du type cas 1 où les mobilités sont maximales dans les vacuoles, excepté aux points limites, et les k_r du type cas 3 (k_r dit « en croix ») donnent des résultats très proches des courbes expérimentales. Ces deux cas semblent appropriés pour simuler le drainage dans les configurations à $\Delta\rho\neq 0$. Les résultats des simulations en terme de ΔP reproduisent bien les plateaux correspondant aux remplissages à $P_c=0$ des vacuoles observés lors des différentes expériences de drainage, les cinétiques de production sont respectées même si cette variable n'est pas la plus sensible pour décrire complètement l'écoulement. Dans la configuration à $\Delta\rho=0$, cette conclusion est moins claire que pour le cas où $\Delta\rho\neq 0$. Par contre, le cas 2, où les mobilités sont quasi nulles dans les vacuoles sur une large gamme de saturation, ne permet pas de reproduire correctement les mécanismes physiques. Que l'on soit en configuration $\Delta\rho\neq 0$ ou $\Delta\rho=0$, les vacuoles ne sont pas drainées. De ce fait, les productions sont sous-estimées et les signaux de différence de pression sont surestimés et montrent des percées précoces par rapport aux signaux expérimentaux. Les évolutions de la perte de charge correspondant au remplissage des vacuoles ne sont plus visibles.
2. les simulations, cas 1 et cas 3, produisent des résultats quasi équivalents pour les processus de drainage et d'imbibition. Il semblerait que pour respecter les processus d'envahissement séquentiel observé lors du drainage, les valeurs de perméabilités relatives dans les vacuoles doivent être supérieures à celles de la matrice pour toute valeur de la saturation. Dans ces conditions, les variations des différentes caractéristiques simulées sont très faibles.
3. pour les imbibitions des différents milieux, il est difficile de statuer sur le meilleur choix entre les perméabilités relatives des cas 1 ou cas 2. Pour l'imbibition du milieu E2 (configuration $\Delta\rho\neq 0$), même si les calages sont de moins bonne qualité que lors du drainage, le cas 1 conduit à un meilleur accord entre simulation et expérience. Le temps caractéristique de remplissage des

vacuoles est largement différent, cependant l'imbibition s'effectue dans cette région (on s'appuie ici surtout sur l'observation des profils de saturation). Les résultats de simulation correspondant au cas 2 sont éloignés des résultats expérimentaux : les vacuoles ne se désaturent pas en huile, la courbe de production est donc sous-estimée. Par contre, pour le milieu E4 (toujours avec une configuration où $\Delta\rho\neq 0$), les deux cas testés donnent des résultats quasi identiques, le cas 2 semblant légèrement en meilleur accord avec les résultats expérimentaux que le cas 1. Pour l'imbibition du milieu E6 (configuration $\Delta\rho=0$), aucun des deux cas ne permet un bon calage. L'imbibition n'a pas lieu dans les vacuoles dans les deux cas, les profils de saturation simulés sont très différents de ceux obtenus expérimentalement. Cela dit, le signal ΔP obtenu avec le cas 1 semble en meilleur accord avec l'expérience (en terme de percée et de niveau de ΔP maximal).

4. de meilleurs accords avec le signal de différence de pression ΔP notamment, pourraient peut-être être obtenus, dans le cas de l'imbibition et quelque soient les conditions, $\Delta\rho\neq 0$ ou $\Delta\rho=0$, avec une meilleure caractérisation de la mouillabilité du système saumure/huile/roche, cette identification pouvant améliorer les données de pression capillaire dans la région matricielle.

En fait, pour reproduire les mécanismes physiques du processus de drainage, le choix des perméabilités relatives k_r doit être tel que les mobilités des fluides dans les vacuoles soient supérieures aux mobilités des fluides dans la matrice. Par contre, lors des imbibitions, comme les déplacements sont gouvernés par les forces capillaires de la matrice, le choix de k_r dans les cavités semble plus arbitraire. De ce fait, une meilleure estimation de la pression capillaire dans la matrice est plus importante que le choix de perméabilités relatives dans la région vacuolaire.

Chapitre 4

4 Conclusions et perspectives

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux écoulements diphasiques de fluides incompressibles dans des milieux poreux hétérogènes modèles de type vacuolaire. Notre objectif était double :

- Réaliser des expériences dans le but d'une description phénoménologique des écoulements polyphasiques, et d'un suivi de l'évolution des phases en particulier dans les vacuoles. Cette partie visait à fournir des données expérimentales exploitables lors d'une étude numérique.
- Effectuer une étude numérique de la configuration expérimentale en utilisant un logiciel de type industriel consistant à résoudre le problème de l'écoulement diphasique s'appuyant sur le modèle de Darcy généralisé et effectuer des comparaisons directes entre résultats expérimentaux et numériques.

Le chapitre 2, consacré à l'étude expérimentale, nous a permis, grâce à un système de visualisation directe dans les vacuoles, de mesurer les saturations dans la matrice poreuse et le gradient de pression, de fournir une description phénoménologique des écoulements eau/huile dans un milieu poreux vacuolaire.

Des comportements différents, suivant que l'on soit en phase de drainage ou d'imbibition, ou que les fluides présentent ou non un contraste de masse volumique, sont observés.

Pour les expériences où $\Delta\rho \neq 0$, une ségrégation gravitaire des phases a été observée comme attendu.

On a également noté que selon les mécanismes de déplacement, les cinétiques de production, l'évolution des saturations et les signaux de différence de pression se comportaient différemment selon le processus.

En drainage, on a observé que lors du remplissage des vacuoles, le front huile/saumure restait immobile dans la matrice : les vacuoles se saturaient en huile séquentiellement. L'écoulement s'effectue en priorité dans la zone la plus perméable et où la pression capillaire est la plus faible. Ainsi, des plateaux correspondant aux remplissages des vacuoles sont observés sur le signal de différence de pression. Le signal de différence de pression est une bonne signature des différentes étapes d'envahissement successif de la matrice et des vacuoles.

Par contre, en imbibition, l'envahissement de la matrice s'effectuait simultanément avec le remplissage des vacuoles. Cette fois-ci, les vacuoles ne se remplissaient pas séquentiellement, les percées étaient précoces et les productions diphasiques très longues. Les effets capillaires de la région matricielle sont le rôle moteur de l'écoulement. Sur le signal de différence de pression, les plateaux visualisés en drainage ne sont plus observés.

Pour les expériences où $\Delta\rho=0$, la ségrégation gravitaire des deux phases n'a plus lieu, le contraste de densités étant nul.

Comme pour le cas où $\Delta\rho\neq 0$, les différents paramètres suivis continuellement lors des expériences ont montré les mêmes différences de comportement selon que l'on soit en drainage ou en imbibition. Toutefois, lors du drainage, le remplissage séquentiel des vacuoles a été moins marqué.

Ces différentes observations ont montré l'importance toute particulière du rôle de la pression capillaire et des perméabilités relatives. Lors de l'imbibition, les effets de capillarité jouent un rôle moteur pour l'écoulement ; une bonne détermination de la pression capillaire est donc nécessaire. Lors du drainage, les perméabilités relatives de la région vacuolaire semblent jouer un rôle prépondérant : quand les vacuoles se remplissent, le front reste quasi statique dans la matrice, les mobilités des fluides doivent être plus importantes dans la zone vacuolaire que dans la zone matricielle.

Le chapitre 3, consacré à l'étude numérique, nous a permis de tester différentes formes des propriétés polyphasiques des vacuoles. Nous avons fait le choix d'un modèle de Darcy généralisé pour simuler un milieu poreux hétérogène dans lequel les vacuoles seraient des zones de porosité unité, de forte perméabilité et de pression capillaire nulle.

Des simulations 1D homogènes ont permis d'identifier des jeux de perméabilités relatives et de pressions capillaires par calage des résultats expérimentaux obtenus sur les milieux homogènes. Ces différents jeux ont ensuite été introduits dans les simulations 2D vacuolaires pour les régions matricielles.

Comme le modèle numérique d'écoulement diphasique macroscopique choisi est du type Darcy/Darcy, nous avons dû intégrer dans les simulations des jeux de pression capillaire et de perméabilités relatives pour les zones vacuolaires. La perméabilité des vacuoles a d'abord été déterminée par résolution d'un problème de Stokes et évaluée à 5.10^{-5} m^2 . Après plusieurs tests et pour des raisons de convenance numérique, elle a finalement été fixée à 10 D. Une pression capillaire nulle était un choix raisonnable vu la grande dimension des vacuoles. Trois cas, correspondant à trois formes de perméabilités relatives dans les vacuoles, ont été testés.

Le cas 1 correspond à des perméabilités relatives dans les vacuoles dont la valeur élevée maximise la mobilité des fluides quelle que soit la valeur de la saturation (excepté aux saturations limites).

Le cas 2, au contraire du précédent, considère de faibles valeurs de la perméabilité relative et minimise la mobilité des fluides dans les vacuoles quelle que soit la valeur de la saturation (excepté aux saturations limites).

Enfin le cas 3, correspond à un choix des perméabilités relatives « en croix » qui ne fait pas d'hypothèse particulière sur la mobilité des fluides mis à part que dans cette configuration, la mobilité d'un fluide augmente d'autant plus que la mobilité de l'autre fluide est réduite.

Les résultats des simulations ont montré que les cas 1 et 3, en terme de récupération, de saturations et de différences de pression, étaient quasi identiques quelque soit le processus de déplacement. Pour permettre la saturation des vacuoles en fluide injecté, il est nécessaire de définir des perméabilités relatives pour la zone vacuaire supérieures à celle de la zone matricielle. Dans ce cas, le remplissage des vacuoles s'effectue intégralement, même si l'effet séquentiel n'est pas observé en imbibition en raison d'une succion capillaire (effets capillaires importants dans la matrice).

Lors des drainages à $\Delta p \neq 0$ et à $\Delta p = 0$, les cas 1 et 3 ont permis de reproduire correctement les mécanismes de déplacement observés lors des expériences contrairement au

cas 2. Le choix de perméabilités relatives telles que les mobilités des fluides soient plus importantes dans la zone vacuolaire que dans la zone matricielle est nécessaire.

Pour les imbibitions, il est difficile de conclure sur le meilleur choix, aucun des cas ne semble bien appropriés pour reproduire les différents phénomènes.

Le choix de perméabilités relatives quasi nulles dans les vacuoles (cas 2) ne permet pas de reproduire correctement le remplissage des vacuoles lors des différents processus : le balayage du fluide initialement présent dans les vacuoles ne s'effectue pas dans les simulations.

Dans cette étude *qualitative*, les choix des cas 1 ou 3 permettent globalement d'effectuer de meilleurs calages entre expériences et simulations lors des processus de drainage, le choix cas 2 est largement incorrect. Avec le modèle de type Darcy généralisé hétérogène utilisé, on a montré que le rôle des perméabilités relatives n'est pas arbitraire. Pour les mécanismes d'imbibition, comme les déplacements sont gouvernés par les forces capillaires de la matrice, la détermination des k_r est moins importante. Par contre, une meilleure estimation de la pression capillaire dans la région matricielle semble nécessaire.

A ce stade, le modèle de type Darcy généralisé hétérogène présente encore des difficultés à restituer correctement les écoulements dans le cas de milieux fortement hétérogènes tels que ceux que nous considérons dans ce travail, essentiellement pour les processus d'imbibition. Cela dit, avec des caractéristiques pétrophysiques adéquates, le modèle semble satisfaisant pour donner une description macroscopique des différents mécanismes. Il serait intéressant d'étudier plus en détails le rôle de la mouillabilité saumure/huile/roche afin d'estimer correctement la pression capillaire dans la matrice.

Nomenclature

Lettres romaines

a	coefficient d'atténuation linéique	m^{-1}
a_i	coefficient d'atténuation linéique de la phase i	m^{-1}
a_o	coefficient d'atténuation linéique de l'huile	m^{-1}
a_w	coefficient d'atténuation linéique de l'eau	m^{-1}
A	section du milieu poreux	m^2
Bd	nombre de Bond	-
Ca	nombre capillaire	-
Ca_{drai}	nombre capillaire en drainage	-
Ca_{imb}	nombre capillaire en imbibition	-
C_o	différence entre la masse volumique maximale et la masse volumique mesurée	$kg.m^{-3}$
C_s	différence entre la masse volumique mesurée et la masse volumique minimale	$kg.m^{-3}$
d	diamètre de la vacuole	m
d_1	diamètre interne de la buse	m
d_2	diamètre externe de la buse	m
d_p	diamètre de particule	m
D	coefficient de diffusion	$m^2.s^{-1}$
DX	épaisseur de maille selon l'axe X	-
DY	épaisseur de maille selon l'axe Y	-
DZ	épaisseur de maille selon l'axe Z	-
F	énergie libre	N.m
G_0	facteur de forme	-
h	constante de Planck	eV.s
I	intensité de rayonnement	eV
J	fonction de Leverett	-
k	perméabilité absolue	m^2
k_{eq}	perméabilité globale de l'échantillon vacuolaire	m^2
k_i	perméabilité effective à la phase i	m^2
k_m	perméabilité de la région matricielle	m^2
k_n	perméabilité d'un nodule poreux	m^2
k_o	perméabilité effective à l'huile	m^2
k_r	perméabilité relative	-
k_{ri}	perméabilité relative à la phase i	-
k_{ro}	perméabilité relative à l'huile	-
k_{rw}	perméabilité relative à l'eau	-
k_v	perméabilité équivalente au sein d'une vacuole	m^2
k_w	perméabilité effective à l'eau	m^2
L	longueur du milieu poreux	m
N	nombre de photons transmis	-
N_0	nombre de photons émis	-
N_1	nombre de photons émis au travers de l'échantillon sec	-
N_2	nombre de photons émis au travers de l'échantillon saturé en eau	-

N_3	nombre de photons émis au travers de l'échantillon saturé en eau et en huile	-
NX	nombre de mailles selon l'axe X	-
NY	nombre de mailles selon l'axe Y	-
NZ	nombre de mailles selon l'axe Z	-
Pe	nombre de Péclet	-
P_0	pression atmosphérique	Pa
P_{01}	pression d'injection	Pa
P_c	pression capillaire	Pa
P_i	pression dans la phase i	
P_o	pression dans l'huile	Pa
P_w	pression dans l'eau	Pa
Q	débit	$m^3.s^{-1}$
Q_i	débit de la phase i	$m^3.s^{-1}$
Re	nombre de Reynolds	-
S^*	saturation réduite	-
S_i	saturation en phase i	-
S_o	saturation en huile	-
S_{or}	saturation résiduelle en huile	-
S_w	saturation en eau	-
S_{wi}	saturation irréductible en eau	-
t	temps	s
u_i	vitesse de filtration	$m.s^{-1}$
V	vitesse d'injection	$m.s^{-1}$
V_x	vitesse d'un fluide	$m.s^{-1}$
VP	volume de pores	m^3
V_t	volume total du milieu poreux	m^3
x_i	épaisseur de la phase i	m
x_{total}	épaisseur du milieu poreux	m

Lettres grecques

α	exposant de Corey pour la pression capillaire	-
α_o	exposant de Corey pour la phase huile	-
α_w	exposant de Corey pour la phase eau	-
γ	source radioactive	-
ΔP	différence de pression	Pa
$\Delta \rho$	différence de masses volumiques	$kg.m^{-3}$
ε	porosité	-
ε_{eq}	porosité globale de l'échantillon vacuolaire	-
ε_m	porosité de la région matricielle	-
ε_v	porosité de la vacuole	-
θ	angle de contact	rad
θ_e	angle de contact à l'équilibre	rad
μ	viscosité dynamique	Pa.s
μ_i	viscosité dynamique de la phase i	Pa.s
μ_o	viscosité de l'huile	Pa.s
μ_w	viscosité de l'eau	Pa.s
ξ	fréquence de l'émission γ	s^{-1}

ρ	masse volumique	kg.m^{-3}
ρ_i	masse volumique de la phase i	kg.m^{-3}
ρ_o	masse volumique de l'huile	kg.m^{-3}
ρ_w	masse volumique de l'eau	kg.m^{-3}
σ	tension interfaciale	N.m^{-1}
ν	coefficient d'atténuation massique	$\text{m}^2.\text{g}^{-1}$

Indices

i	phase i	-
o	huile	-
or	huile résiduelle	-
w	eau	-
wi	eau irréductible	-

Tenseurs et Vecteurs

\mathbf{g}	vecteur accélération de pesanteur	m.s^{-2}
\mathbf{K}	tenseur de perméabilité	m^2
\mathbf{K}_g	tenseur de perméabilité globale	m^2
\mathbf{n}	vecteur normal à la surface	-
\mathbf{v}_i	vecteur vitesse de Darcy de la phase i	m.s^{-1}
\mathbf{v}	vecteur vitesse de Darcy	m.s^{-1}
Σ_i	tenseur des contraintes dans la phase i	N.m^{-2}

Abréviations

Am^{241}	américium 241	-
BO	Black-Oil	-
KI	iodure de potassium	-
PVT	données thermodynamiques : Pression, Volume, Température	-
WOC	water oil contact	-

Références Bibliographiques

1. Arbogast T., Lehr H. L., « *Homogenization of a Darcy-Stokes System Modeling Vuggy Porous Media* », ICES, TICAM report 02-44, Austin, 2002.
2. Archie G. E., « *Classification of Carbonate Reservoir Rocks and Petrophysical Considerations* », American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **36**, 278-298, 1952.
3. Arquis E., « *Transferts en Milieu Poreux et à l'Interface : de l'Echelle Microscopique à l'Echelle Macroscopique* », Thèse d'Etat es-Sciences, Université de Bordeaux 1, 1994.
4. ATHOS, « *User's Guide* », Institut Français du Pétrole, 1997.
5. Bear J., « *Dynamics of Fluids in Porous Media* », Dover publications, Inc., New York, 1972.
6. Beavers G. S., Joseph D. D., « *Boundary Conditions at a Naturally Permeable Wall* », Journal Fluid Mechanics 30, 197-207, 1967.
7. Bertin H., « *Approche Phénoménologique des Ecoulements Polyphasiques en Milieux Poreux : de l'Echelle du Pore vers la Prise en Compte des Hétérogénéités* », Habilitation à Diriger des Recherches Université de Bordeaux 1, 20-43, 1992.
8. Bourgeat A., Quintard M., Whitaker S., « *Eléments de Comparaison entre la Méthode d'Homogénéisation et la Prise de Moyenne avec Fermeture* », Comptes Rendus Académie des Sciences, **306**, série II, 463-466, Paris, 1988.
9. Corey A. T., « *Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media* », Water Resources Publications, 1994.
10. Cossé R., « *Le gisement* », Edition Technip (Paris) et Institut Français du Pétrole, 1988.
11. Danis M., « *Modélisation de l'Écoulement dans un Milieu Poreux d'un Fluide en Présence d'une Phase Piégée* », Thèse Université de Bordeaux 1, LEPT-ENSAM, 1982.
12. Darcy H., « *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* », Dalmont, Paris, 1856.
13. Dauba C., « *Caractérisation Dynamique des Hétérogénéités à Petite Echelle en Milieux Poreux : Application aux Echantillons Vacuolaires* », Thèse ENSAM Centre de Bordeaux, LEPT-ENSAM, 1999.
14. Dauba C., Hamon G., Quintard M., Lasseux D., « *Stochastic Description of Experimental 3D Permeability Fields in Vuggy Reservoir Cores* », Society of Core Analysts 9828, 1998.

15. De Zabala E. F., Kamath J., « *Laboratory Evaluation of Waterflood Behavior of Vugular Carbonates* », Society Petroleum Engineer 30780, Dallas, 1995.
16. Ehrlich R., « *Relative Permeability Characteristics of Vugular Cores, Their Measurement and Significance* », Society Petroleum Engineer 3553, New Orleans, 1971.
17. Goggin D.J., Thrasher R., Lake L.W., « *A Theoretical and Experimental Analysis of Minipermeameter Response Including Gas Slippage and High Velocity Flow Effects* », In situ, **12**, 79-116, 1988.
18. Kamath J., Nakagawa F., Meyer R., Kabir S., Hobbet R., « *Laboratory Evaluation of Waterflood Residual Oil Saturation in Four Carbonate Cores* », Society of Core Analysts, Edinburgh, 17-19, 2001.
19. Labat A., Pierre O., « *Déplacements Diphasiques dans des Milieux Hétérogènes ; Détermination des Propriétés Effectives* », Rapport de Projet de Fin d'Etude (PFE) ENSAM Bordeaux, 2002.
20. Labat A., Pierre O., « *Manuel d'Aide à l'Utilisation de ATHOS et SIMView* », PFE-ENSAM Bordeaux, 2002.
21. Larréa J. C., « *Etude par Simulation Numérique de l'Hydrodynamique au Voisinage d'une Interface Poreuse* », Thèse INP, 05-26, Toulouse, 1991.
22. Lasseux D., Quintard M., Whitaker S., « *Détermination of Permeability Tensors for Two-Phase Flow in Homogeneous Porous Media: Theory* », Transport in Porous Media, **24**, 107-137, 1996.
23. Lasseux D., Pairoys F., Bertin H., « *Fluid Flow in Vugular Porous Media* », Bioconférence, 481-487, Grenoble, 2002.
24. Lucia F. J., « *Carbonate Reservoir Characterization* », Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, New York, 226, 1999.
25. Marie C., « *Simulation de Mesures de Perméabilités par Miniperméamètre en Milieu Poreux* », Rapport de DEA, ENSGTI, Pau, 1999.
26. Marle C., « *Cours de Production tome IV ; Les Ecoulements Polyphasiques en Milieux Poreux* », Edition Technip (Paris) et Institut Français du Pétrole, 1965.
27. Moctezuma-Berthier A., Fleury M., « *Permeability Mapping on Vuggy Core Sample using Tracer Experiments and Streamline Simulations* », Society Petroleum Engineer 58992, Mexico, 1999.
28. Moctezuma-Berthier A., Vizika O., Adler P. M., « *Water-Oil Relative Permeability in Vugular Porous Media: Experiments and Simulations* », Society of Core Analysts 2002-06, Monterey, 2002.

29. Moctezuma-Berthier A., Vizika O., Thovert J. F., Adler P. M., « *One-and Two-Phase Permeabilities of Vugular Porous Media* », *Transport in Porous Media*, **56**, 225-244, 2004.
30. Monicard R., « *Caractéristiques des Roches Réservoirs, Analyse des Carottes* », Edition Technip (Paris) et Institut Français du Pétrole, 1965.
31. Muskat, M., « *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media* », McGraw Hill Book Co. Inc., 480-486, New York City, 1937.
32. Neale G.H., Nader W.K., « *The Permeability of a Uniformly Vuggy Porous Medium* », *Society Petroleum Engineer Journal* 3812, 69-74, 1973.
33. Nicholls C.P., Heaviside J., « *Gamma Ray Absorption Techniques Improve Analysis of Core Displacement Tests* », *Society Petroleum Engineer Formation Evaluation* 14421, 69-75, 1988.
34. Pairoys F., Lasseux D., Bertin H., « *An Experimental and Numerical Investigation of Water-Oil Flow in Vugular Porous Media* » *Society of Core Analysts* 2003-20, Pau, 2003.
35. Quintard M., Whitaker S., « *Ecoulement Monophasique en Milieu poreux : Effet des Hétérogénéités Locales* », *Journal de Mécanique théorique et appliquée*, **06**, 691-726, 1987.
36. Quintard M., Whitaker S., « *Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media: The Method of Large-Scale Averaging* », *Transport in Porous Media*, **03**, 357-413, 1988.
37. Saez A.E., Otero C.J., Rusinek I., « *The Effective Homogeneous Behaviour of Heterogeneous Porous Media* », *Transport in Porous Media*, **04**, 213-238, 1989.
38. Whitaker S., « *Flow in Porous Media: a Theoretical Derivation of Darcy's Law* », *Transport in Porous Media*, **01**, 03-25, 1986.

Annexes

ANNEXE 1 :

Tests de sensibilité à la pression capillaire et aux perméabilités relatives sur les différents signaux simulés par variation des différents coefficients de Corey sur les simulations du milieu homogène E3 (expérience $\Delta p \neq 0$).

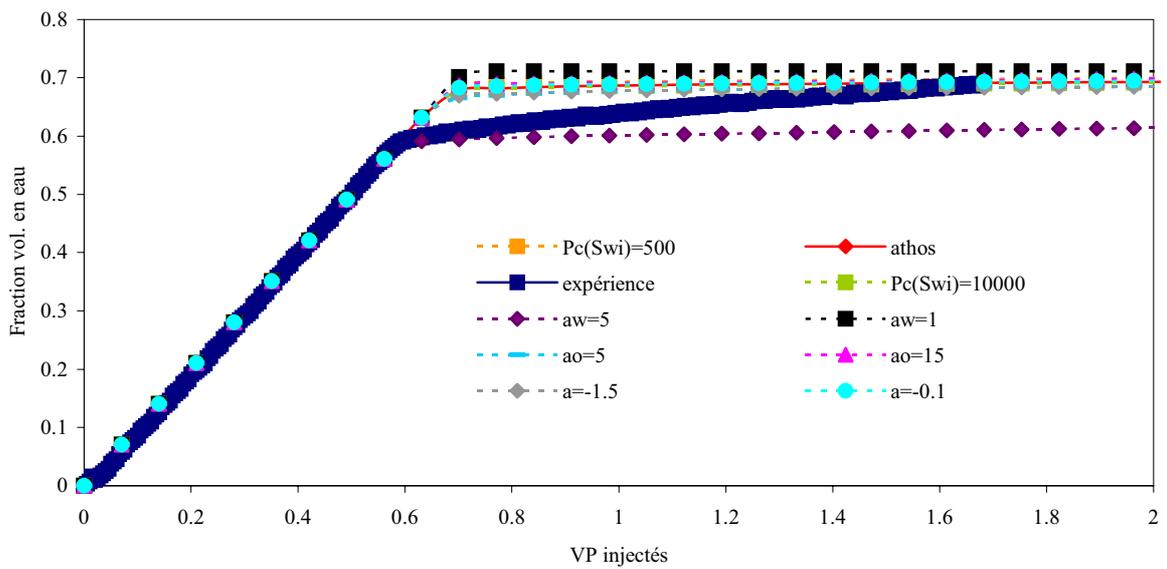
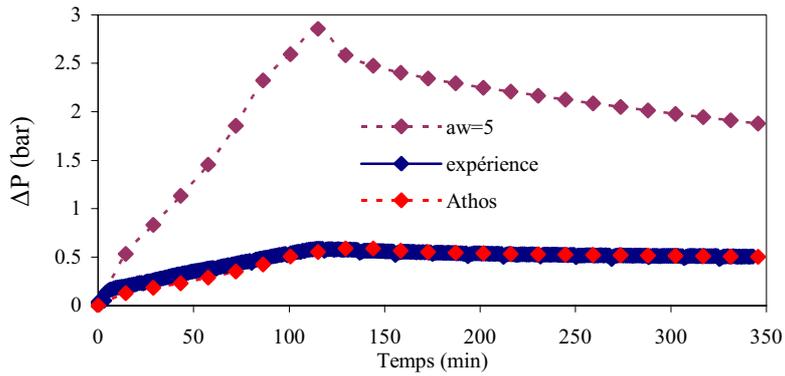
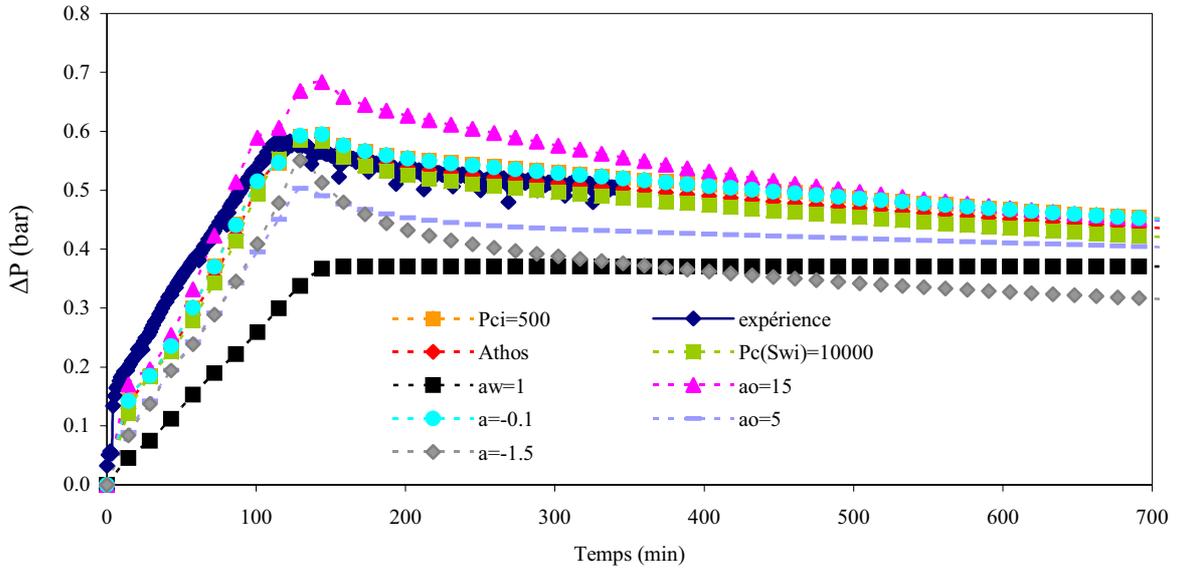
Dans chaque simulation, on fait varier les coefficients α_w , α_o , $P_c(S_{wi})$ ou α un par un en préservant les autres coefficients choisis lors des calages numériques avec l'expérience.

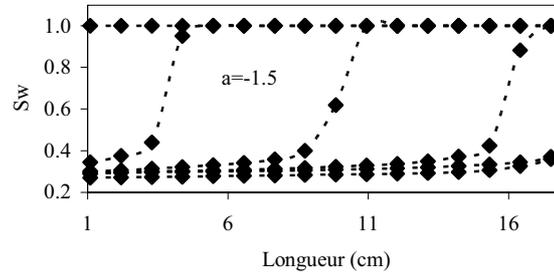
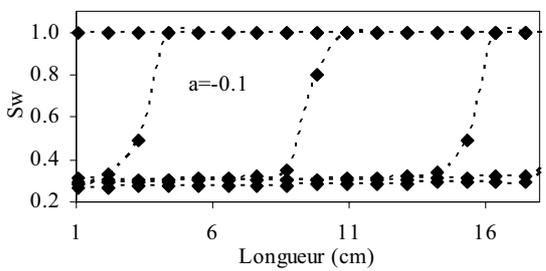
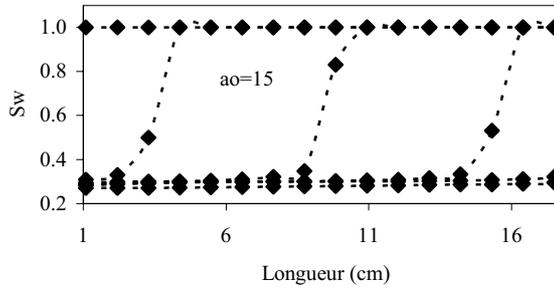
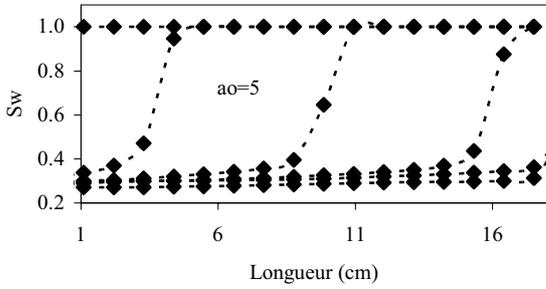
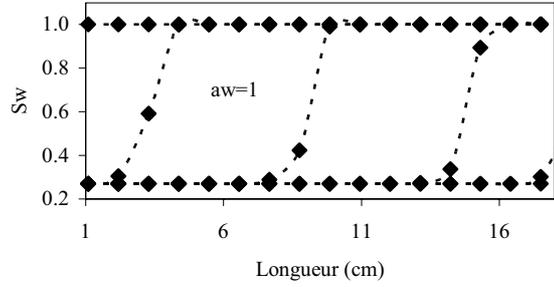
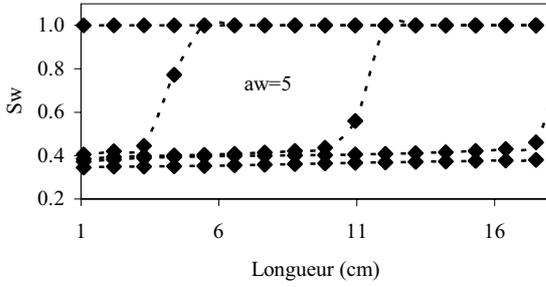
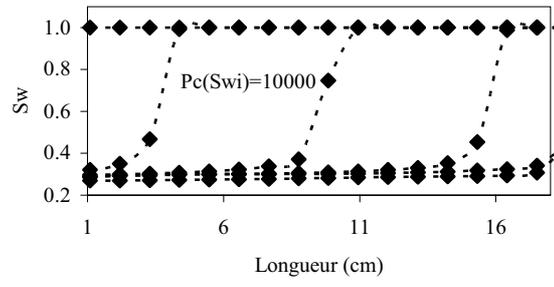
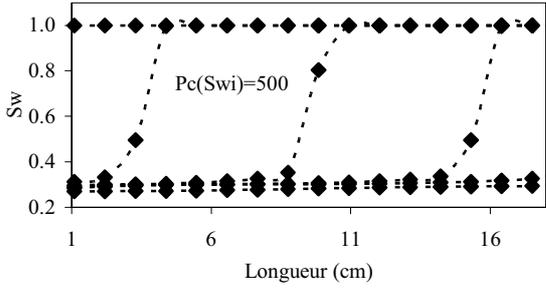
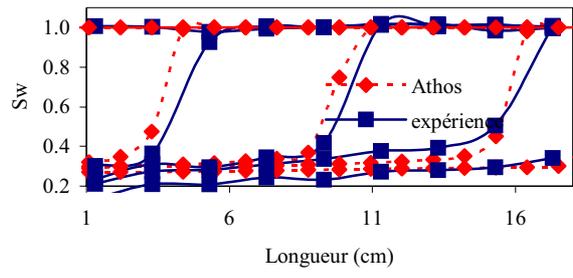
Voici le récapitulatif de coefficients choisis pour réaliser les calages simulations/expérience sur le milieu homogène E3 :

E3 ($\Delta p \neq 0$)	α_o	α_w	$P_c(S_{wi})$	α
drainage	10	2,5	6000	-0,5
imbibition	1,5	1,1	2000	-0,5

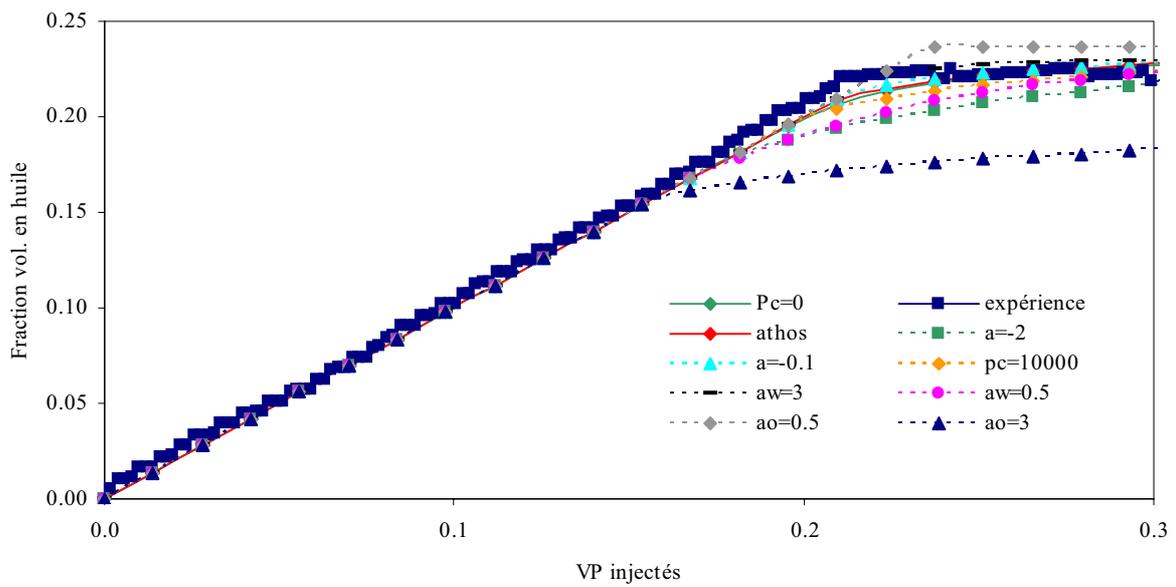
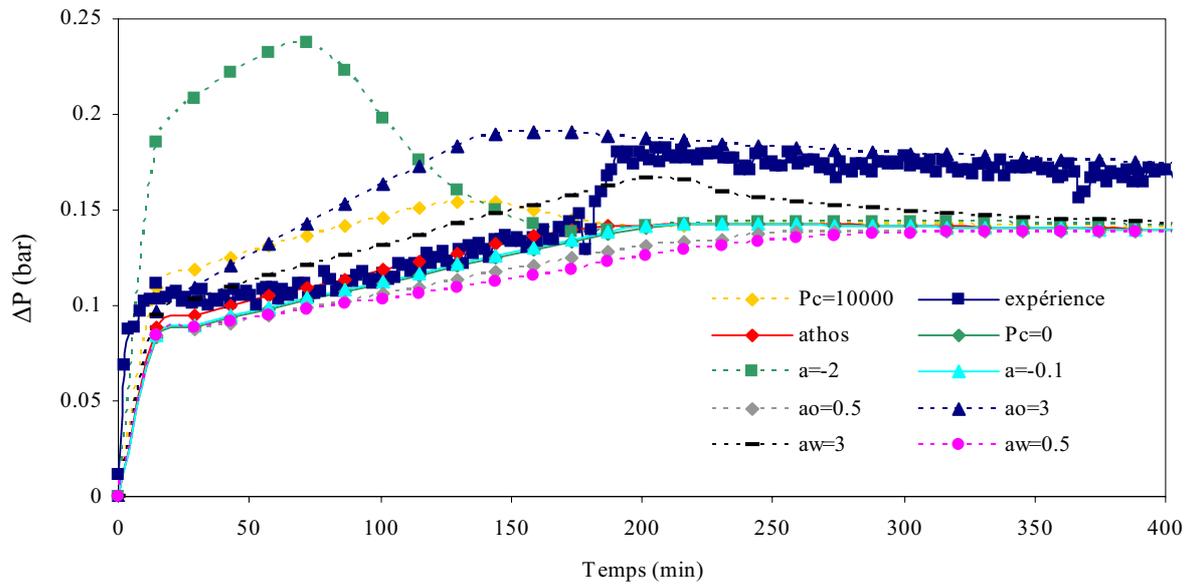
N.B. : dans les résultats qui suivent, « athos » correspond aux résultats de simulation obtenus avec les coefficients de Corey répertoriés dans le tableau précédent, « expérience » correspond aux signaux expérimentaux. Il faut préciser que dans les différents tests réalisés, $a_i = \alpha_i$ ($i=w, o$).

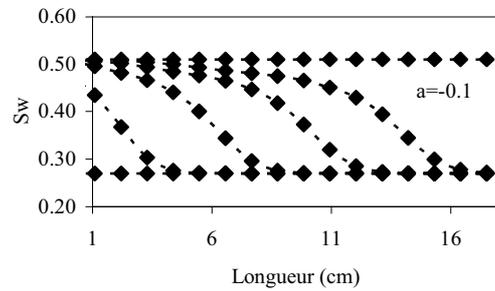
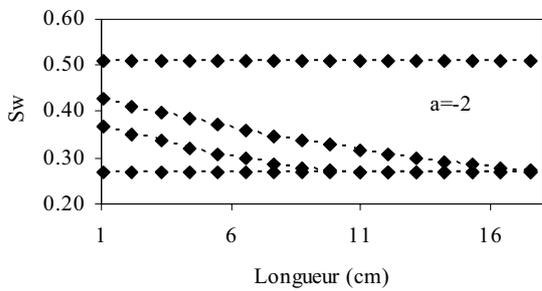
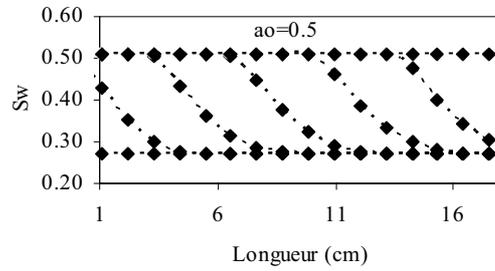
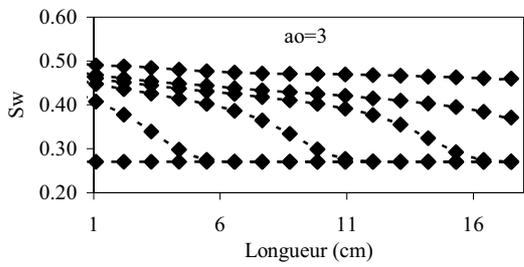
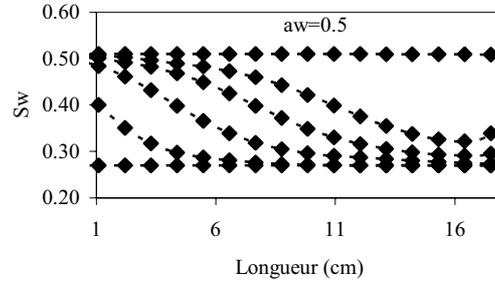
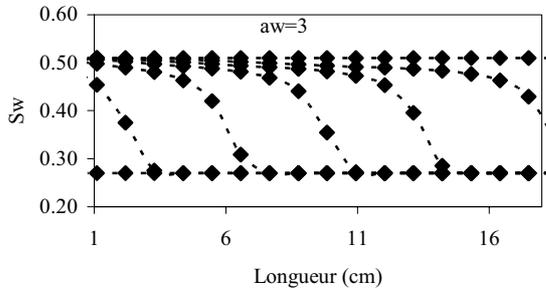
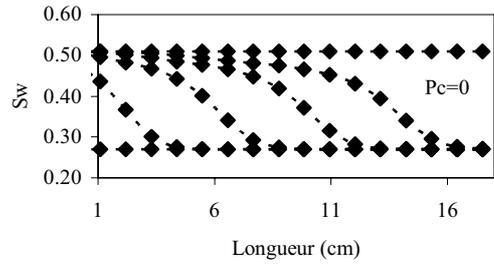
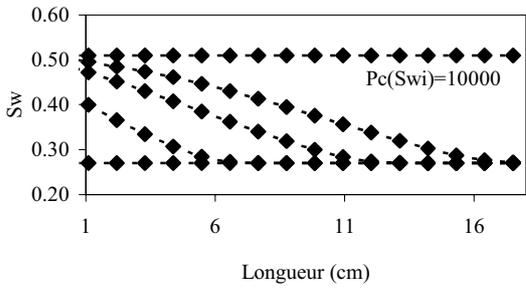
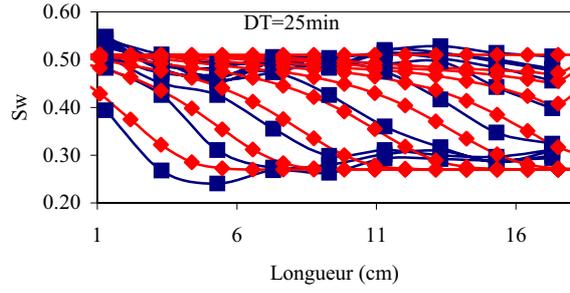
• DRAINAGE





• IMBIBITION



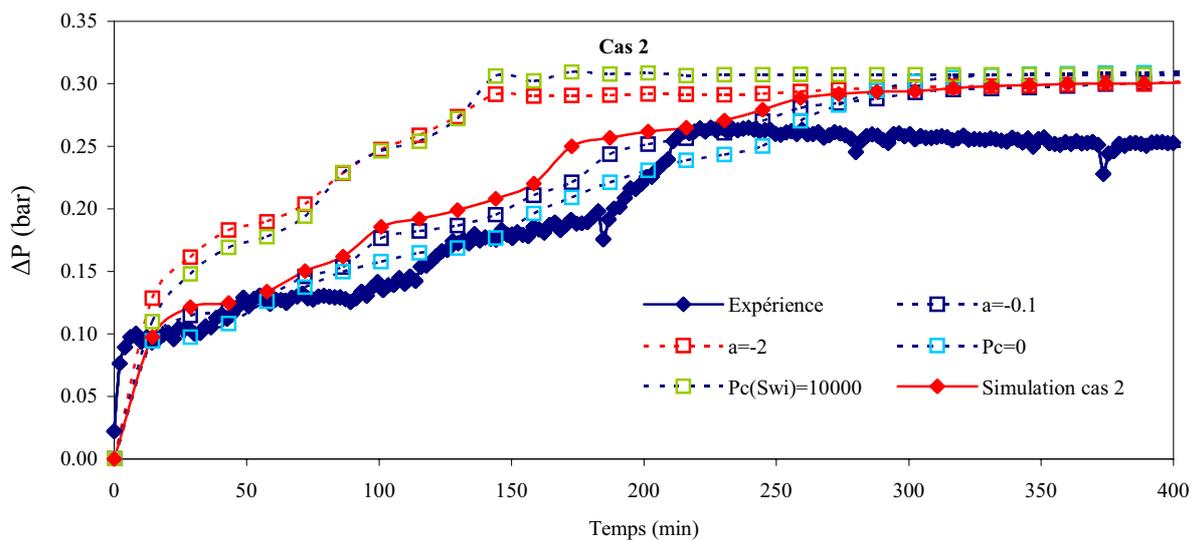
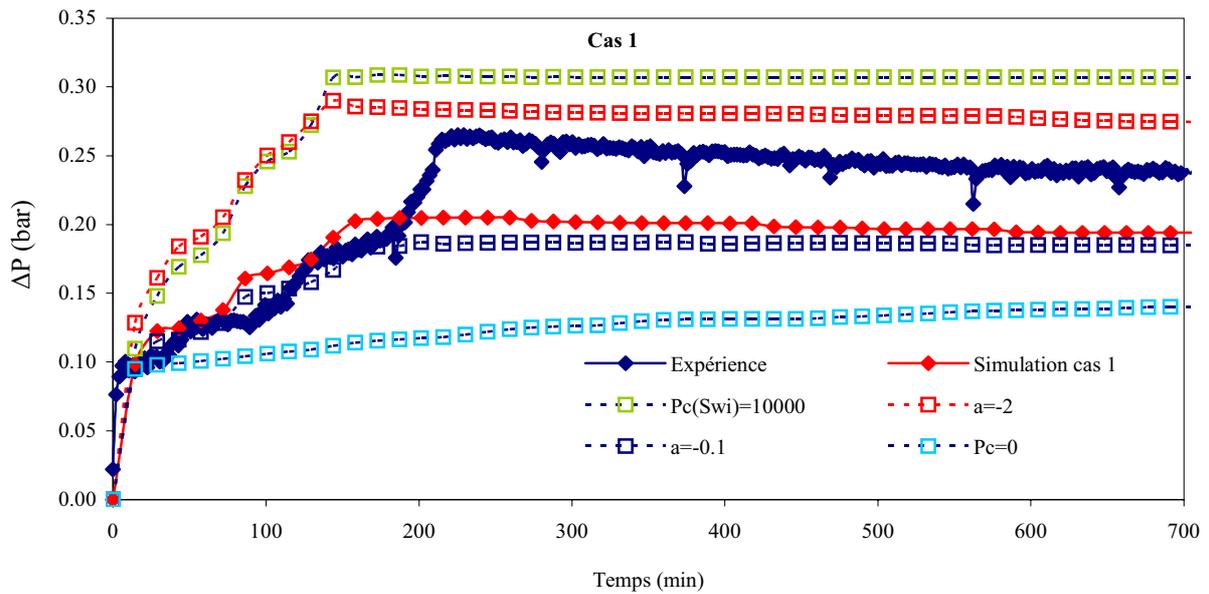


ANNEXE 2 :

Tests de sensibilité à la pression capillaire sur le signal de différence de pression par variation des coefficients de Corey α et $P_c(S_{wi})$ dans la matrice lors de l'imbibition du milieu vacuolaire E4.

Cas 1 : les mobilités des deux fluides sont plus importantes dans les vacuoles que dans la matrice sur une très large gamme de saturation.

Cas 2 : les mobilités sont quasi nulles dans les vacuoles, excepté aux points limites.



RESUME

Les milieux poreux vacuolaires se rencontrent dans de nombreux réservoirs spécialement dans les réservoirs carbonatés. Ils sont constitués d'une matrice poreuse continue, parsemée de cavités (appelées vacuoles) résultant de processus de diagenèse complexe. Dues à leur structure, ces milieux poreux ont des propriétés de transport spéciales, l'optimisation de la récupération de l'huile nécessite alors une bonne description des écoulements eau/huile.

Les échantillons modèles vacuolaires sont obtenus à partir de barreaux de grès, représentant la matrice poreuse homogène et continue dans laquelle des trous cylindriques, représentant les vacuoles, sont réalisés. Des fenêtres transparentes, placées de part et d'autre des vacuoles, permettent une visualisation directe de la distribution et de l'évolution des phases durant l'écoulement. Dans cette configuration, l'écoulement est bidimensionnel et les cartes de saturation sont obtenues à partir de mesures locales de saturation utilisant la technique d'atténuation d'un rayonnement γ . Durant les cycles de drainage et d'imbibition, des mesures de saturation, de différence de pression et de récupération sont effectuées. Deux couples saumure/huile ont été testés dans le but de mettre en évidence les effets relatifs des forces de gravité et de viscosité.

Des simulations numériques 2D, utilisant un logiciel industriel, sont réalisées sur les milieux vacuolaires. Dans notre configuration, un modèle de type Darcy généralisé hétérogène est testé. Le milieu vacuaire est représenté par deux régions correspondant respectivement à la matrice et aux vacuoles. Les propriétés pétrophysiques de la matrice sont identifiées par calage des résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon homogène similaire, sans vacuoles. Dans la région vacuaire, une pression capillaire nulle est choisie et plusieurs types de perméabilités relatives à l'huile et à l'eau sont testés : les évolutions de pression, de saturation et de production sont finalement comparées à celles obtenues expérimentalement.

MOTS CLES

Milieux poreux vacuolaires – Ecoulements eau/huile – Drainage – Imbibition – Modèle de type Darcy généralisé hétérogène – Perméabilités relatives – Pression capillaire

ABSTRACT

Vugular porous media are found in many reservoirs especially those constituted of carbonate rocks where large cavities (called vugs) resulting from complex diagenetic processes are embedded in the porous matrix. Due to their structure, these porous materials have special transport properties and optimization of oil recovery from such reservoirs requires a good description of two-phase -oil and water- flow.

Model vugular samples were obtained from a sandstone core, representing the continuum and homogeneous porous matrix through which cylindrical holes, representing the vugs, were drilled. Transparent windows, placed in front of the vugs allow a direct observation of the two-phase distribution and the evolution during flow. Due to the configuration, the flow is two-dimensional and saturation maps were obtained from local saturation measurement in the porous matrix using a γ -ray attenuation technique. During drainage and imbibition cycles, saturation, pressure and recovery measurements are performed. Using different density contrasts between oil and brine, the relative effect of viscous and gravity forces was investigated.

Two-dimensional numerical simulations were performed on the experimental configuration using an industrial software. In our configuration, a heterogeneous generalized Darcy's model is tested. The vugular core was represented by a two-region medium corresponding to the matrix and vugs respectively. Petrophysical properties of the porous matrix were assigned by fitting experimental two-phase flow results obtained on a separate but similar homogeneous core -without vugs. In the region corresponding to the vugs, a zero capillary pressure was used while different sets of oil and water relative permeabilities were tested for comparison of pressure and saturation evolution on the vugular core with experimental data.

KEY WORDS

Vugular porous media – Water-oil flow – Drainage – Imbibition – Heterogeneous generalized Darcy system – Relative permeabilities – Capillary pressure