

THESE

présentée à

l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

par

Alain GENTY

Ingénieur de l'INPG en
Génie Énergétique et Nucléaire

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR

en

Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives

VALIDATION EXPÉRIMENTALE D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE
DE DÉPLACEMENT DIPHASIQUE EN MILIEU POREUX

Soutenue le 31 Mai 1996 devant le jury composé de :

MM	B. LEGAIT	Président
	J.P. HULIN	Rapporteur
	R. LENORMAND	Rapporteur
	M. QUINTARD	Examineur
Mme	A. TRÉGOURES	Examinatrice
M	P. GOBLET	Directeur de Thèse

Table des matières

Notations et Symboles Utilisés

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction 1

Chapitre 1

Physique du déplacement diphasique 5

I. APPROCHE ADIMENSIONNELLE 5

I.1 Introduction 5

I.1.1 Analyse inspectionnelle 6

I.1.2 Analyse dimensionnelle 6

I.1.3 Conclusion 7

I.2 Analyse inspectionnelle 7

I.3 Analyse dimensionnelle 12

I.4 Récapitulatif	15
I.5 Groupes de similitude importants	16
I.6 Conclusion	17
II. RÉGIMES D'ÉCOULEMENT	18
II.1 Écoulements "types"	18
II.2 Carte de régimes d'écoulements sans phénomènes gravitationnels	21
II.3 Les critères d'instabilité visqueuse	23
II.3.1 La méthode de Dietz	23
II.3.2 La méthode des petites perturbations	24
II.3.3 Conclusion	26
II.4 Théories et expérimentations	27
II.5 Carte de régimes d'écoulement et gravité	30
II.6 Théories et expérimentations	33
II.7 Conclusion	36
III. DONNÉES POUR UN STOCKAGE TYPE	36

Chapitre 2

Expérimentation	39
I. CHOIX EXPÉRIMENTAUX GÉNÉRAUX	39

I.1 Les fluides	39
I.2 Le milieu poreux	40
II. DESCRIPTION DU SYSTÈME EXPÉRIMENTAL	41
II.1 Les fluides utilisés	41
II.1.1 Le fluide mouillant	41
II.1.2 Le fluide non mouillant	42
II.2 La maquette de milieu poreux	42
II.2.1 Nature du milieu poreux	42
II.2.2 La maquette	42
II.2.3 La méthode de remplissage	45
II.3 Propriétés physiques de la maquette de milieu poreux	47
II.3.1 Porosité du milieu	47
II.3.2 Perméabilité du milieu	48
II.3.3 Courbes de perméabilités relatives	49
II.3.4 Courbe de pression capillaire	50
III. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL	51
III.1 Variables mesurées	52
III.2 Montage expérimental	53
III.3 Influence du montage sur les données recueillies	54

III.4 Expérimentations réalisées	55
--	----

Chapitre 3

Le modèle numérique	59
I. Présentation du modèle	59
I.1 Description des lois générales d'écoulement	59
I.2 Méthodes de résolution des équations	61
I.3 Propriétés attendues du modèle numérique	62
II. Tests numériques du modèle	62
II.1 Sensibilité spatio-temporelle du modèle pour un maillage monodimensionnel	62
II.1.1 <i>Solution analytique et erreur relative</i>	63
II.1.2 <i>Influence du maillage</i>	64
II.1.3 <i>Le pas de temps de calcul</i>	65
II.1.4 <i>Maillage et pas de temps fixe</i>	65
II.1.4.a Résultats	66
II.1.4.b Le temps calcul	67
II.1.4.c Pas de temps calcul maximal	67
II.1.4.d Conclusion	68
II.1.5 <i>Maillage et pas de temps automatique</i>	68
II.1.5.a Résultats	68
II.1.5.b Le temps calcul	70
II.1.5.c Conclusion	70
II.1.6 <i>Conclusion</i>	70

II.2 Comparaison avec la sensibilité spatio-temporelle d'autres modèles	71
II.2.1 <i>Solution analytique et maillage</i>	71
II.2.2 <i>Résultats</i>	74
II.2.2.a résultats bruts	74
II.2.2.b Les autres modèles numériques	75
II.2.2.c Comparaison des résultats	76
II.2.3 <i>Le temps calcul</i>	79
II.3 Influence des courbes de perméabilités relatives	79
II.3.1 <i>Lois de perméabilités relatives</i>	80
II.3.2 <i>Solutions analytiques et simulations numériques</i>	81
II.3.3 <i>Variation de courbure des perméabilités relatives</i>	82
II.3.4 <i>Variation des saturations résiduelles</i>	83
II.3.4.a Solution analytique et résultats numériques	83
II.3.4.b Interprétation physique	83
II.3.5 <i>Variation des perméabilités relatives maximales</i>	84
II.3.6 <i>Conclusion</i>	85

Chapitre 4

Résultats expérimentaux et simulations	87
I. SIMULATION EN INCOMPRESSIBLE	87
I.1 L'expérimentation	87
I.2 La modélisation	89
I.3 Comparaison entre simulations et expérimentation	90

I.3.1	<i>Le temps de percée</i>	90
I.3.2	<i>Courbe de production d'eau</i>	91
I.3.3	<i>Surpression à l'entrée du milieu</i>	92
I.4	Comparaison avec les résultats d'autres modèles	93
I.4.1	<i>Le temps de percée</i>	93
I.4.2	<i>La courbe de production d'eau</i>	95
I.4.3	<i>Surpression à l'entrée du cylindre de milieu poreux</i>	96
I.5	Conclusion	98
II.	SIMULATION EN COMPRESSIBLE	98
II.1	Résultats expérimentaux	99
II.1.1	<i>Temps de percée et saturation en gaz à cette date</i>	99
II.1.2	<i>Expérimentations et carte de régimes d'écoulement</i>	101
II.1.2.a	<i>L'observation visuelle</i>	102
II.1.2.b	<i>Les saturations en gaz au temps de percée</i>	108
II.1.3	<i>Exemple de données expérimentales et analyse.</i>	109
II.1.3.a	<i>Déplacement de type stable avec aspects capillaires</i>	109
II.1.3.b	<i>Déplacement de type visqueux</i>	111
II.1.3.c	<i>Déplacement de type visco-capillaire</i>	111
II.2	Simulations Numériques	112
II.2.1	<i>Caractéristiques de la modélisation</i>	112
II.2.2	<i>Temps de percée simulés et expérimentaux</i>	113
II.2.3	<i>Déplacement stable avec des aspects capillaires simulé et expérimental</i>	115

II.2.4 Déplacement visqueux simulé et expérimental	117
II.2.5 Déplacement visco-capillaire simulé et expérimental	120
II.2.6 Conclusion	122
II.3 Discussion	123
III. CONCLUSION	128

Chapitre 5

Stockage fictif de déchets radioactifs	131
I. Stockage EVEGAS	131
I.1 Caractéristiques du stockage	131
I.2 Simulations simplifiées	133
I.3 Champs de saturation en gaz à $T = 200$ ans	134
I.3.1 Champs obtenus par Bright, Eclipse, Genesys, Porflow et Tough	134
I.3.2 Champs de saturation obtenus par SUNIDJ	135
I.3.3 Comparaison des champs de saturation obtenus	138
I.4 Conclusion	138
Conclusion générale	141
Bibliographie	143
Annexe A	155

Annexe B	157
Annexe C	173
Annexe D	175